ASTROFÍSICA
Supernovas desconcertantes

SALUD PÚBLICA
Las secuelas del agente naranja

CONSERVACIÓN
Galápagos: ¿resistirá la biodiversidad?



40 ANIVERSARIO 1976 - 2016

Agosto 2016 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de Scientific American

El auge de los mamíferos

Nuestros ancestros comenzaron a abrirse paso mucho antes de la extinción de los dinosaurios

INFORME ESPECIAL
LA EDAD DE ORO DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

EL AUGE DE LOS MAMÍFEROS | SUPERNOVAS DESCONCERTANTES | SECUELAS DEL AGENTE NARANJA

N.º 479

AGOSTO 2016



6,90 EUROS



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Agosto 2016, Número 479

ARTÍCULOS

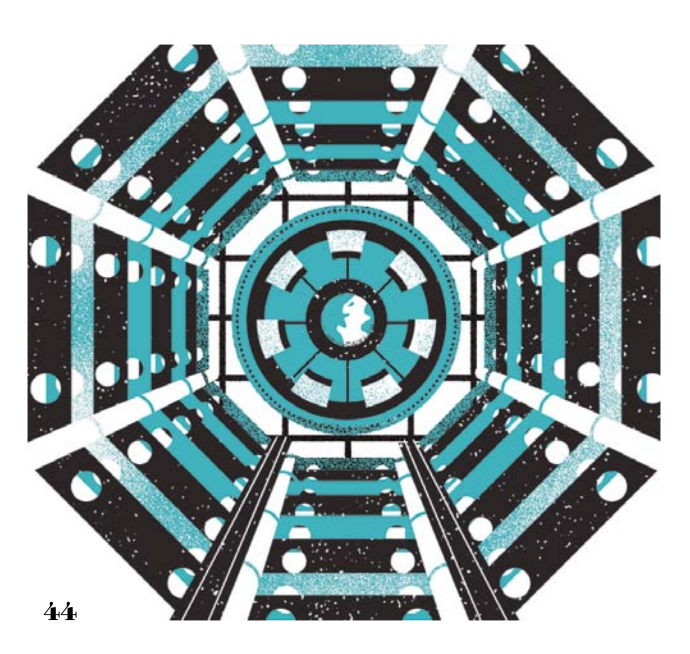
CORTESÍA DE PHILIPP MOESTA. UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA EN BERKELEY



6



40



44

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Volaticotherium, un mamífero que vivió hace 160 millones de años, presentaba una membrana entre las extremidades superiores e inferiores que le permitiría planear entre las ramas como una ardilla voladora de nuestros días. Los fósiles de esta y otras especies revelan que los mamíferos se diversificaron en un grado sorprendente mucho antes de que los dinosaurios se extinguieran. Imagen de James Gurney.



redaccion@investigacionyciencia.es


Enero y abril 2016

NIÑOS MULTILINGÜES

En «Cómo adquieren los bebés el lenguaje» [Investigación y Ciencia, enero de 2016], Patricia K. Kuhl sostiene que, entre los seis meses y los siete años de edad, los niños pueden aprender con rapidez una o dos lenguas. Según mi experiencia, puedo decir que los bebés y los niños pequeños son capaces de adquirir varios idiomas simultáneamente si cuentan con el entorno social y familiar adecuado.

Mi esposa y yo hemos tenido la suerte de proporcionar ese entorno a nuestras cuatro hijas, quienes aprendieron alemán, árabe, francés e inglés ya en sus primeros años de vida. Mi esposa, alemana, y yo, hablante nativo de árabe, nos hemos comunicado en inglés desde que nos conocimos. Criamos a nuestras hijas en Francia, donde asistieron a una escuela en la que se enseñaba en francés e inglés; además, varias horas a la semana eran cuidadas por una persona de habla francesa. Después, cuando nuestras niñas tenían entre tres y ocho años, nos mudamos a España. A los tres meses de comenzar el colegio ya hablaban español.

Para lograr esa competencia lingüística es fundamental que cada persona se comunique con los niños en su lengua materna. También es necesario insistirles en que no mezclen idiomas cuando se dirigen a una misma persona, a fin de que puedan asociar a cada individuo con su primera lengua.

Azzam Qasrawi
Ronda, Málaga

¿GUERRA DE TELESCOPIOS?

Nos hemos sentido enormemente decepcionados al leer el artículo de Katie Worth «La guerra de los telescopios» [Investigación y Ciencia, febrero de 2016]. Muy al contrario de lo que se afirma en el texto, las «rivalidades personales» del pasado han desempeñado un papel muy pequeño en la historia del Telescopio de Treinta Metros (TMT) y del Telescopio Gigante Magallanes (GMT). Por qué los repetidos intentos de la Institución Carnegie para la Ciencia de unirse al TMT han sido rechazados una y otra vez es una historia compleja cuyos detalles completos solo los conocen los investigadores del Instituto de Tecnología de California y de la Universidad de California, pero está claro que la dinámica interna de la colaboración y los intentos de controlar el desarrollo técnico del telescopio ejercieron una gran influencia. Al final, los miembros de Carnegie tiramos la toalla cuando quedó claro que no seríamos más que un socio pequeño y pasivo, y cuando el GMT, proyectado por J. Roger Angel, se convirtió en una alternativa más seductora.

Por otro lado, afirmar que Estados Unidos carece de fondos suficientes para apoyar ambos proyectos es incorrecto. Tanto el GMT como el TMT son colaboraciones internacionales. El 80 por ciento del dinero del TMT y el 20 por ciento de los fondos del GMT vienen de fuera, por lo que, en la práctica, Estados Unidos solo está financiando un telescopio.

Por último, tres telescopios de gran tamaño (el TMT, el GMT y el Telescopio Europeo Extremadamente Grande) es lo mínimo que necesitará la comunidad astronómica internacional para poder hacer investigación de calidad durante las próximas décadas. No hay pruebas ni es sensato pensar que el TMT o el GMT hubiesen tenido un diseño más avanzado en caso de haber contado con más dinero. Los desafíos técnicos a los que se enfrenta la construcción de telescopios de gran tamaño son abrumadores, y son estos los que marcan el ritmo.

Augustus Oemler
Alan Dressler
Observatorios Carnegie

PLASTICIDAD CEREBRAL

He sentido algo más que enfado al leer que la prevención o el tratamiento del autismo se encuentran entre los posibles usos de los nuevos hallazgos sobre neuroplasticidad referidos en el artículo, por lo demás excelente, «El poder del cerebro infantil», de Takao K. Hensch [Investigación y Ciencia, abril de 2016]. Irónicamente, el último párrafo del texto saca a colación un argumento contra semejante «cura»: supondría un cambio neural tan invasivo que equivaldría a violar la identidad de la persona. Al contrario que la esquizofrenia o la ambliopía, el autismo no es separable de la individualidad de quien lo tiene. Por si fuera poco, semejante retórica promueve las increíblemente dañinas «terapias correctivas» pavlovianas, como ciertas formas del análisis conductual aplicado.

Soy autista. Como tal, me he encontrado con docenas de personas autistas, he atendido a discursos suyos y he leído ensayos escritos por ellos. Puedo asegurarle que ninguno de nosotros quiere que nos «curen».

Paul Eisen

En su artículo, Hensch expresa su preocupación por la posibilidad de que una reorganización de las conexiones cerebrales pueda «debilitar el sentido de uno mismo». No acabo de entender esa evaluación negativa. El «yo» no es más que un constructo humano arbitrario y sobrevalorado. Mucho se ha escrito en la filosofía budista sobre lo poco deseable que resulta dicho concepto. De hecho, este punto de vista se muestra acorde con la propia afirmación de Hensch sobre las ventajas de la meditación para aumentar la plasticidad y, por tanto, para diluir el sentido de uno mismo.

Prevesh Rustagi
Fort Wayne, Indiana

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



TRESCIENTOS turones patinegros viven en zoológicos y forman parte de un programa de cría en cautividad. Unos cientos más viven de nuevo en libertad.

BOB ROZINSKI, GETTY IMAGES

CONSERVACIÓN

Resurrección genética

Con el fin de salvar el turón patinegro, el Servicio de Fauna y Pesca de EE.UU. planea reforzar su diversidad genética inyectando ADN antiguo a individuos vivos

En 1987, la ciencia solo conocía 18 ejemplares de turón patinegro, pero gracias a la cría en cautividad y a la gestión intensiva, este mustélido cuenta ahora con unos cientos de individuos. Pero a semejanza de otras tantas especies recuperadas a partir de tan escaso número de sobrevivientes, todos los individuos son medio hermanos casi clónicos, con la misma predisposición a sufrir problemas hereditarios, patógenos potenciales o cambios ambientales que podrían abocarlos a la desaparición. En un intento por renovar la variabilidad genética del turón y mejorar sus expectativas a largo plazo, el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE.UU. (SPVS) planea una solución radical: reintroducir parte del ADN perdido de la especie que aún preservan los ejemplares muertos conservados en zoológicos y museos. La iniciativa puede sonar menos irrealizable que el sueño de resucitar al mamut lanudo, pero implica revivir genes que murieron con sus portadores, por lo que no resultará sencillo.

El cuello de botella del turón patinegro es aún peor de lo que parece. De los 18 individuos que el SPVS rescató hace casi treinta años en las praderas de EE.UU., solo siete transmitieron sus genes a las generaciones posteriores. «Todos los turones descienden de esos siete individuos», afirma Kimberly Fraser, portavoz del Centro Nacional para la Conservación del Turón Patinegro, del SPVS. «Imaginemos que se tratara de siete personas: ¿qué sucedería?»

El año pasado, genetistas financiados por la iniciativa Revive & Restore, impulsada por la Fundación Long Now secuenciaron los genomas de dos turones vivos y el ADN de un macho y una hembra que fallecieron en los años ochenta y permanecen congelados en el Zoológico de San Diego. La comparación de ambas parejas indica que esa buscada diversidad genética existe y que podría reincorporarse a la población viviente mediante, por ejemplo, la clonación o la edición genética CRISPR. Esta posibilidad ha sido estudiada como medio para resucitar a especies como la paloma migratoria y, sobre el papel, podría servir para engendrar clones de los turones congelados, que serían cruzados con los turones vivos. Otra opción sería retocar el genoma de los clones para insertar secuencias de ADN que codifican anticuerpos contra dos infecciones frecuentes: la peste bubónica y el moquillo canino. O bien se podrían eliminar los genes que predisponen a los turones a padecer esas enfermedades. «¿Y todo eso para contar con dos fundadores genéticos más? Eso sería mucho», aclara Ryan Phelan, director ejecutivo de Revive & Restore.

El turón cuenta con bazas a su favor: procrea con rapidez y tiene prósperos parientes cercanos que podrían servir como sustitutos en los ensayos preliminares de clonación. Pero no es nada nuevo que ese tipo de manipulaciones genéticas afrontan numerosas trabas, como hallar financiación y abordar los escollos legales que rodean los proyectos genéticos relativos a especies amenazadas. Y a ellos se suman los obstáculos de carácter técnico, como la notoria dificultad que supone crear un clon viable y la larga deliberación so-

bre qué genes añadir o suprimir. El grupo de Revive & Restore pretende iniciar este año las primeras labores de edición genética en células cultivadas, con los auspicios de la Sociedad Zoológica de San Diego, pendientes de conseguir aún la financiación y los investigadores necesarios.

Si el rescate genético ayuda a prosperar al turón patinegro, tal vez funcione con otros animales y plantas que los conservacionistas intentan salvar, como anfibios casi exterminados por un hongo quitridio y el consanguíneo diablo de Tasmania, que está siendo diezmado por un cáncer facial contagioso. De hecho, un esfuerzo de restauración genética similar ya está en marcha para salvar al rinoceronte blanco septentrional, una subespecie de la que solo restan tres ejemplares. Se recurrirá al esperma congelado de machos muertos y a «gametos artificiales», células madre transformadas en células sexuales que albergan variantes de los genes restaurados. El equipo internacional de científicos responsable de la iniciativa detalló recientemente su plan en *Zoo Biology*, donde informaron que este rinoceronte se puede dar por extinto si no se llevan a cabo esfuerzos extraordinarios por evitarlo.

Ante esas tesituras, existen aspectos éticos a tener en cuenta. Un argumento de peso contra el rescate de especies en extinción es que el dinero no se debería derrochar en resucitar al mamut cuando hay elefantes que salvar, y los escasos fondos disponibles se invertirían mejor en proteger el entorno o en reforzar las medidas contra la caza furtiva. El proyecto del turón, empero, tal vez demuestre que las técnicas de rescate genético son aplicables a la conservación de especies vivas al borde de la desaparición. Tal y como Phelan explica: «Es una cuestión de hasta qué punto, como custodios, estamos dispuestos a socorrer a especies que no poseen toda la adaptabilidad evolutiva que hubieran tenido de ser las cosas distintas».

Sin ese esfuerzo de restauración genética, la consanguineidad podría condenar la especie al declive y a la extinción

La meta que se marca el SPVS es disponer de una población silvestre de 3000 turones reproductores repartida en 30 grupos, y planea repoblar con ellos el último lugar en que se hallaron en libertad: Meeteetse, Wyoming. Sin ese esfuerzo de restauración genética, la consanguineidad podría condenar la especie al declive y a la extinción. «No sé si podremos invertir cien años en un programa de cría en cautividad y seguir con las limitaciones que tenemos en los genes. Pero espero ver el rescate genético con mis ojos», confiesa Fraser.

—David Biello

SALUD

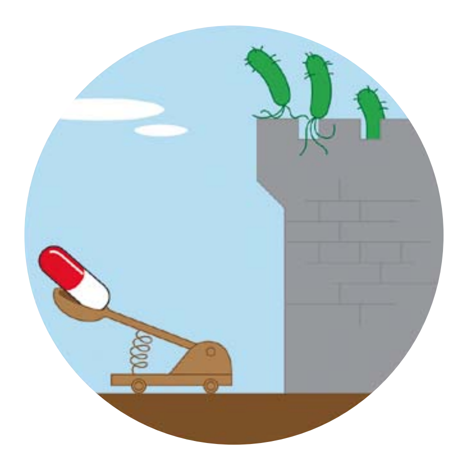
Debilitar las biopelículas bacterianas

Cortar los azúcares que mantienen cohesionadas las comunidades microbianas podría potenciar la eficacia de los antibióticos

Las bacterias son pegajosas, tan pegajosas que pedimos cita periódicamente con profesionales para arrancarlas de nuestra dentadura. La placa dental tal vez sea el mejor ejemplo de biopelícula, pero estos agregados pegajosos de bacterias también desempeñan un papel crucial en las infecciones crónicas como las que afectan a las vías urinarias y respiratorias de los pacientes con fibrosis quística. ¿El problema? A menudo los antibióticos no pueden penetrar en ellas para destruir las bacterias patógenas que se parapetan en su interior.

Para construir la biopelícula, las bacterias segregan azúcares correosos, proteínas y fragmentos de ADN que tejen una malla defensiva en torno a ellas, convirtiendo esas estructuras del mundo microbiano en el equivalente a ciudades amuralladas, según el biólogo estructural Perrin Baker, del Hospital Infantil de Toronto. Él y su colega Lynne Howell han estado trabajando en métodos para desmantelar esas murallas. «Lo que pretendemos es abrir brechas que sirvan de entrada al ejército invasor», explica Howell.

Para abrir esas grietas, los investigadores dirigieron su atención a *Pseudomonas aeruginosa*, una bacteria que a menudo forma biopelículas en los pulmones de los pacientes con fibrosis quística, lo que puede causar en-



THOMAS FUCHS

fermedad pulmonar obstructiva crónica y, en última instancia, la muerte. *P. aeruginosa* fabrica diversas enzimas que aclaran la maraña de azúcares de la biopelícula para abrirse paso a través de ella. Baker y Howell quisieron comprobar si era posible aprovechar en beneficio propio esas enzimas.

Primero extrajeron dos enzimas «desbrozadoras» de los microbios y después las añadieron a placas de Petri tapizadas de biopelículas. Tal y como relataban hace poco en *Science Advances*, comprobaron que las enzimas destruían la mayoría de las redes de azúcares segregados por diversas cepas de *Pseudomonas*. En una cepa, el 94 por ciento de la masa de la biopelícula se disolvió al entrar en contacto con ellas.

Ahora bien, aunque las enzimas desmontan grandes partes de la biopelícula, las bacterias del interior quedan indemnes. Así pues, el método no es un remedio milagroso, asegura el experto en enfermedades infecciosas de la Universidad Stanford Paul Bollyky, que no ha participado en el estudio. Pero deja al descubierto la inmensa mayoría de las bacterias residentes, que se vuelven así vulnerables a una tanda de antibióticos o al ataque del sistema inmunitario.

Ahora intentarán averiguar si las enzimas son tan eficaces en la destrucción de las biopelículas creadas en los pulmones de ratones como lo han sido en las placas de Petri. A Baker también le interesa comprobar si recubrir los equipos hospitalarios con enzimas que degraden los azúcares ayudaría a prevenir la aparición de los microbios resistentes a los antibióticos.

—Diana Crow

NANOTECNOLOGÍA

Nueva vacuna contra la alergia

Los alérgenos ocultos en el interior de nanopartículas hacen más seguras y eficaces las vacunas antialérgicas

Los primeros síntomas de picazón en los ojos o el moqueo incesante empujan a las personas alérgicas a la farmacia a comprar algo que las alivie. Sin embargo, estos medicamentos solo mejoran los síntomas de la alergia pero no logran abordar la raíz del problema: la reacción exagerada de nuestro sistema inmunitario frente a sustancias inocuas. La única cura es una serie de inyecciones de pequeñas dosis de alérgenos que desensibilizan el organismo durante unos meses o años. Sin embargo, numerosos pacientes evitan estas vacunas debido a los posibles efectos secundarios graves que provocan, como la anafilaxia.

Ese dilema ha llevado a Stephen Miller, de la Universidad Noroccidental, y a Lonnie Shea, de la Universidad de Michigan, a desarrollar un método más seguro que oculta transitoriamente el contenido de las vacunas frente a los ataques del sistema inmunitario.

Para enseñar a las defensas a diferenciar los elementos dañinos de los inocuos, es necesario que las células inmunitarias que se desarrollan en el hígado y en el bazo se familiaricen con las proteínas inofensivas que deberán dejar en paz más tarde. El problema es que las células inmunitarias maduras a veces atacan a los alérgenos que contiene una inyección antes de que lleguen a estos centros de aprendizaje. Por ello, el inmunólogo Miller y el ingeniero biomédico Shea han diseñado un método de administración semejante a un caballo de Troya: un alérgeno envuelto en una nanopartícula. Estas partículas tienen aproximadamente el mismo tamaño que los restos de las células muertas de la sangre, por lo que el sistema inmunitario las registra como desechos normales y las deja atravesar el torrente sanguíneo hasta el hígado y el bazo. Una vez allí, el revestimiento de las partículas se disuelve y libera los alérgenos.

Tal y como se ha publicado en un nuevo artículo en la revista *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, los investigadores ensayaron esa estrategia en ratones alérgicos a la ovoalbúmina, una proteína del huevo. Los científicos cargaron inicialmente nanopartículas con esa proteína, que por sí sola provocaría una reacción alérgica grave, y luego inyectaron las nanopartículas en cinco ratones. Estos no mostraron reacción alguna. Más tarde, cuando se les inyectó

EVOLUCIÓN

El pico sin dientes ayudó a sobrevivir

¿Subsistieron los antepasados de las aves modernas gracias a su alimentación a base de semillas?



Hace 66 millones de años, un asteroide se estrelló contra la Tierra y se calcula que aniquiló a tres cuartas partes de los seres vivientes. Ese episodio, que como sabemos causó la extinción de todos los dinosaurios, lleva a la siguiente pregunta: ¿cómo sobrevivieron los ancestros de las aves modernas cuando todos sus allegados perecieron? Un nuevo estudio publicado en *Current Biology* plantea la hipótesis de que algunos dinosaurios aviares perduraron porque poseían picos sin dientes y pudieron subsistir a base de semillas resistentes al fuego, mientras que las fuentes de alimento de la mayoría de las demás especies desaparecieron.

Derek Larson, conservador adjunto del Museo de Dinosaurios Philip J. Currie de Alberta, y sus colaboradores analizaron en primer lugar más de 3000 dientes fósiles de dinosaurios aviares que poblaron el oeste de Norteamérica durante el período Cretácico. A partir del tamaño y la forma, llegaron a la conclusión de que esos dientes apenas sufrieron cambios en 18 millones de años. Ello indica que los dinosaurios aviares permanecieron estables hasta la extinción masiva.

Puesto que el registro fósil aviar está incompleto, el equipo reconstruyó los hábitos alimentarios de los ancestros de las aves actuales con la ayuda de un modelo estadístico de la evolución. Este indica que los antepasados desdentados probablemente se alimentaron de semillas. Juntos, esos análisis sugieren que lo que ayudó a sobrevivir a esos dinosaurios aviares fue una combinación de la dentición y la alimentación.

Para sustentar su hipótesis, Larson también cita un notable volumen de datos aportado por el estudio de los incendios forestales actuales. Dichas investigaciones señalan que algunas semillas escapan indemnes al fuego y que las aves granívoras se hallan entre la fauna que primero regresa a los bosques calcinados, una situación análoga a la de la superficie terrestre tras el impacto en Chicxulub.

GETTY IMAGES (*cacahuetes*); MIKE POWLES, GETTY IMAGES (*aves*)

ovoalbúmina directamente para ver si todavía eran alérgicos, los ratones no presentaron signos de inflamación en las vías respiratorias. Además, los análisis de sangre revelaron un aumento del número de linfocitos T reguladores, que atenúan el sistema inmunitario. Estos resultados indican que los alérgenos encapsulados en nanopartículas se deslizaron entre las defensas del organismo de forma camuflada, y que el sistema inmunitario aprendió posteriormente que estos alérgenos no eran dañinos.

El uso de nanopartículas en los tratamientos de la alergia podría ofrecer una herramienta poderosa para combatir una variedad de alergias e incluso trastornos autoinmunitarios como la esclerosis múltiple, de acuerdo con Kari Nadeau, director del Centro Sean Parker N. para la Investigación de Alergias y Asma en la Universidad Stanford. Ello se debe a que las nanopartículas pueden rellenarse con activadores inmunitarios de numerosas sustancias, incluido el polen y los ácaros del polvo. Algunos investigadores ya han visto resultados positivos en sus experimentos con nanopartículas para el tratamiento de la alergia a los cacahuetes. Próximamente, Miller y Shea planean realizar un ensayo clínico para la celiaquía, una enfermedad en la que el sistema inmunitario reacciona de forma exagerada frente a las proteínas de trigo.

—Monique Brouillette

El enfoque adoptado por Larson para intentar explicar de qué modo sobrevivió la fauna hace 66 millones de años es imaginativa y digna de ser tenida en cuenta, afirma Julia A. Clarke, paleontóloga de vertebrados de la Universidad de Texas en Austin, ajena al estudio. Pero matiza que la dinámica de las extinciones es compleja y que los indicios aportados por los fósiles aviares en otras partes del mundo nos narran una historia diferente. «Acabo de regresar de la Antártida, donde he permanecido dos meses trabajando con fósiles del Cretácico superior, y lo que hemos visto es que las especies eran acuáticas. Según nuestra comparación con las aves vivientes, presumiblemente comían algas y peces», explica.

Asimismo, la investigación indica que los ancestros cretácicos de los avestruces, los emúes y las anátidas carecían de dientes, pero probablemente devoraban pequeños vertebrados e insectos, aparte de semillas, añade Clarke. «Me sorprendería mucho que la alimentación granívora fuera el único determinante de la supervivencia o la extinción.»

—David Godkin

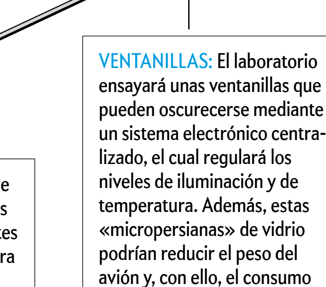
AVIACIÓN

Aeronave modelo

Un nuevo laboratorio simulará viajes aéreos de principio a fin para determinar el futuro del diseño de las cabinas

Un vuelo comercial no es un buen lugar para realizar experimentos, al menos con un mínimo de rigor científico. Tanto a los fabricantes de aviones como a las líneas aéreas les gustaría probar con nuevos diseños de cabinas, de la disposición de los asientos y de los procedimientos de embarque, pero efectuar ensayos con pasajeros a 12.000 metros de altura es carísimo, potencialmente peligroso e imposible de controlar. Ahora, el Consejo Nacional de Investigaciones de Canadá está construyendo en Ottawa una instalación que emula varios aspectos de los viajes aéreos, con una cabina reconfigurable que puede simular de manera fiel vuelos de varias horas de duración. Según Paul Lebbin, director del proyecto, los estudios realizados en este laboratorio «servirán para que las compañías compaginen la rentabilidad y los deseos de los pasajeros». Está previsto que la construcción de la instalación, para la que ya hay varios experimentos programados, comience este verano.

—Jennifer Hackett



JACKSON LEE

SALUD

Juegos Olímpicos a prueba de zika

Varias delegaciones tomarán medidas adicionales para evitar la infección, desde el uso de uniformes que repelen a los mosquitos hasta el de preservativos con lubricante antiviral

El Ministerio de Sanidad brasileño calcula que, en la primera mitad de año, hubo en el país casi 150.000 nuevos casos de zika. Tales números han sembrado dudas entre deportistas y aficionados sobre la conveniencia de viajar a Río de Janeiro para asistir a las Olimpiadas. El virus, transmitido en gran parte por mosquitos, resulta bastante inocuo para la mayoría de las personas (tres de cada cuatro infectados no desarrollan síntomas), pero puede provocar graves malformaciones en el feto si quien contrae la enfermedad es una mujer embarazada.

A pesar de todo, los expertos en enfermedades infecciosas sostienen que el pánico creado carece de fundamento. «Para la mayoría de las personas, incluidas las mujeres que no estén embarazadas, ir a Río será bastante seguro», apunta Ashish K. Jha, director del Instituto de la Salud Mundial de Harvard. «Sin duda, deberán tomarse las precauciones habituales si se viaja como deportista o como espectador, pero si la gente pone cuidado y usa repelente de insectos, no creo que haya prueba alguna de que se necesiten otras medidas ni de que estas fueran a servir para algo.»

También la Organización Mundial de la Salud y el Comité Olímpico Internacional aseguran que el peligro de contraer zika durante los Juegos no será excesivamente alto. Y, a la luz de los nuevos modelos sobre la transmisión de la enfermedad y del mejor conocimiento que se tiene sobre la actividad del mosquito en agosto —menor de lo habitual—, la mayoría de los epidemiólogos y expertos en enfermedades infecciosas coinciden en que no hay razón para posponer las Olimpiadas. Con todo, nada de lo anterior ha impedido que algunos equipos tomen precauciones adicionales para evitar la propagación del virus entre sus deportistas.

—Knvul Sheikh



CANADÁ Se instalarán mosquiteras en las ventanas de los dormitorios para impedir la entrada de insectos. Otras delegaciones tendrán la opción de pagar para contar con esta mejora.



COREA DEL SUR Los deportistas vestirán pantalones largos, así como camisas y chaquetas de manga larga impregnadas con repelente de mosquitos. Estos uniformes «a prueba de zika» se usarán durante las ceremonias, los entrenamientos y en la Villa Olímpica.



AUSTRALIA Para evitar la transmisión del virus por vía sexual, los deportistas recibirán preservativos con un lubricante antiviral aprobado en Australia como defensa contra el VIH, el herpes y el virus del papiloma humano.



ESPAÑA El Comité Olímpico Español ha llegado a un acuerdo con los laboratorios Omega Pharma para proveer a la delegación olímpica de un repelente de mosquitos de eficacia probada contra varias enfermedades, entre ellas el zika.

NEUROCIENCIA

Así trata el cerebro la física

Para aprender ciencia, nuestro cerebro readapta redes neuronales encargadas de procesar información cotidiana

Los primeros *Homo sapiens* no sabían nada de la teoría de la relatividad general de Einstein. Sin embargo, hoy se espera que cualquier estudiante de física entienda al menos sus principios básicos. «¿Cómo es posible que nuestros "antiguos" cerebros aprendan nuevas ciencias y representen conceptos abstractos?», se pregunta Marcel Just, neurocientífico de la Universidad Carnegie Mellon. En un trabajo cuyos resultados aparecieron publicados en junio en *Psychological Science*, Just y su colaborador Robert Mason hallaron que, al pensar en conceptos físicos, el cerebro pone en marcha patrones de activación cerebral correspondientes a capacidades neuronales cotidianas, como procesar el ritmo o la estructura de una frase. Es decir, dichos patrones se readaptan para aprender conceptos científicos abstractos.

Just y Mason tomaron imágenes cerebrales de nueve estudiantes avanzados de física e ingeniería mientras se centraban en 30 conceptos físicos, como momento, entropía o corriente eléctrica. Después, introdujeron los datos en un programa informático de aprendizaje automatizado, el cual logró predecir en qué estaban pensando los sujetos a partir de su actividad cerebral. Eso fue posible porque los patrones neuronales que intervenían al considerar un concepto determinado (la gravedad, por ejemplo) eran los mismos en todos los participantes. «Cada uno aprende física en aulas diferentes, con profesores distintos y a su propio ritmo», observa Mason. «Así que no deja de resultar sorprendente que, en todos los estudiantes, se hayan desarrollado las mismas regiones cerebrales para entender un concepto físico.»

Los investigadores compararon los escáneres de su estudio con investigaciones previas que habían asociado ciertas actividades neuronales a procesos mentales concretos. Vieron que, ante los conceptos científicos de frecuencia o longitud de onda, se activaban las mismas regiones que al contemplar bailarines, escuchar música u oír una pauta rítmica, como el galope de un caballo; probablemente, porque todos esos casos implican percibir algún tipo de periodicidad. Por otro lado, cuando los estudiantes se enfrentaban a ecuaciones matemáticas, las zonas afectadas eran las que de ordinario se encargan de procesar las frases. Los resultados dan a entender que algunas estructuras neuronales genéricas se readaptan para ocuparse de nociones científicas complejas. «Por tanto, aunque algunos de esos conceptos solo se hayan formalizado en los últimos dos siglos, nuestro cerebro ya estaba hecho para vérselas con ellos», señala Just.

Mason cree que tales hallazgos podrían contribuir algún día a determinar qué lecciones deben enseñarse juntas para facilitar su comprensión. Ahora, Just y él tienen pensado continuar sus investigaciones con otras ciencias de las que nuestros antepasados sabían poco, como la genética y la informática.

—Jordana Cepelewicz

GETTY IMAGES (*banderas*); © ISTOCKPHOTO/FATIDO (*bandera española*) © ISTOCKPHOTO/CHATCHAISURAKRAM (*Péndulo de Newton*)



LOS CLOROPLASTOS son los orgánulos encargados de llevar a cabo la fotosíntesis en las células vegetales.

ENERGÍA

Hojas biónicas

Un nuevo dispositivo emula la fotosíntesis para obtener combustible

Una hoja de árbol, una brizna de hierba o una simple célula de alga: todas ellas producen combustible a partir de agua, luz solar y dióxido de carbono por medio de la fotosíntesis. Ahora, un grupo de científicos afirma haber reproducido —y mejorado— este proceso gracias a una «hoja biónica».

En un trabajo conjunto, el grupo de Daniel Nocera, químico de Harvard, y el de Pamela Silver, bióloga de la misma universidad, han fabricado una especie de batería viva a la que han llamado «hoja biónica» por su combinación de biología y tecnología. El dispositivo usa la electricidad generada por un panel fotovoltaico para proporcionar energía al proceso químico que disocia el agua en hidrógeno y oxígeno. Después, una serie de microorganismos absorben el hidrógeno y convierten el CO_2 del aire en alcohol, el cual puede emplearse como combustible. En 2015, el mismo equipo ya obtuvo su primer dispositivo fotosintético artificial, el cual producía 216 miligramos de alcohol por litro de agua. Sin embargo, el catalizador de níquel, molibdeno y zinc que hacía posible la disociación del agua adolecía de un desafortunado efecto secundario: envenenaba a los microorganismos.

Así las cosas, los investigadores emprendieron la búsqueda de un catalizador mejor. Tal y como explican en un artículo publicado el pasado mes de junio en *Science*, lo han encontrado en una aleación de cobalto y fósforo, una amalgama que ya se usa como recubrimiento anticorrosivo para componentes de plástico y metal. Gracias al nuevo catalizador, la eficiencia en la producción de combustibles como isopropanol e isobutanol ha aumentado en un 10 por ciento. Por cada kilovatio hora de electricidad, los microorganismos extraen del aire 130 gramos de CO_2 y sintetizan 60 de isopropanol, una conversión diez veces más eficiente que la lograda por la fotosíntesis natural.

Nocera sostiene que, al sintetizar combustible a partir del CO_2 del aire, el nuevo biorreactor podría ayudar a paliar el aumento en la concentración del gas responsable del calentamiento global y, al mismo tiempo, proporcionar combustibles más limpios a quienes no disponen de fuentes modernas de energía. —*David Biello*

ED RESCHKE, GETTY IMAGES

SOSTENIBILIDAD

¿Cuánta comida tiramos?

Los resultados del primer estudio mundial sobre el derroche alimentario son tan desoladores como cabía esperar

Desde los productos que se pudren en los camiones de reparto hasta las raciones excesivas de los restaurantes, la cantidad de comida que desperdiciamos es enorme. Según expertos del Instituto de Investigaciones sobre Impacto Climático de Potsdam, el despilfarro medio por día y por persona ha aumentado desde 310 kilocalorías en 1965 hasta 510 en 2010. Eso viene a ser como haber estado echando seis manzanas a la basura cada día, y ahora tirar diez. Según los investigadores, en 2050 la cifra podría llegar a las 850 kilocalorías.

Dado que es imposible calcular con exactitud cuánta comida se desperdicia, los expertos se valieron de un indicador auxiliar: el excedente alimentario; es decir, la diferencia entre la cantidad de comida que un país produce o importa para su consumo y el total de calorías que necesita la población. Tras hacer números para 169 países (el 98 por ciento de la población mundial), obtuvieron que, en 2010, el año más reciente del que hay datos, la cantidad de comida disponible en el mundo superaba en un 20 por ciento a la necesaria para alimentar a todos los seres humanos. Los investigadores observaron que, en general, cuanto mayor era el nivel de vida de una nación, más comida se derrochaba. Los resultados aparecieron publicados el pasado mes de abril en *Environmental Science & Technology*.

¿De veras va a parar toda esa comida sobrante a la basura? No necesariamente, explica Prajal Pradhan, geoecólogo y uno de los autores del trabajo. Por un lado, la gente suele comer más de lo que necesita (un cálculo a su vez complejo y subjetivo); por otro, algunos residuos se aprovechan para alimentar al ganado. Por tanto, es probable que el estudio exagere la cantidad de comida que se derrocha, si bien Pradhan matiza que su cálculo tuvo en cuenta las variaciones en los datos de peso corporal con el objetivo de compensar, al menos en parte, el hecho de que hay personas que, sencillamente, comen demasiado.

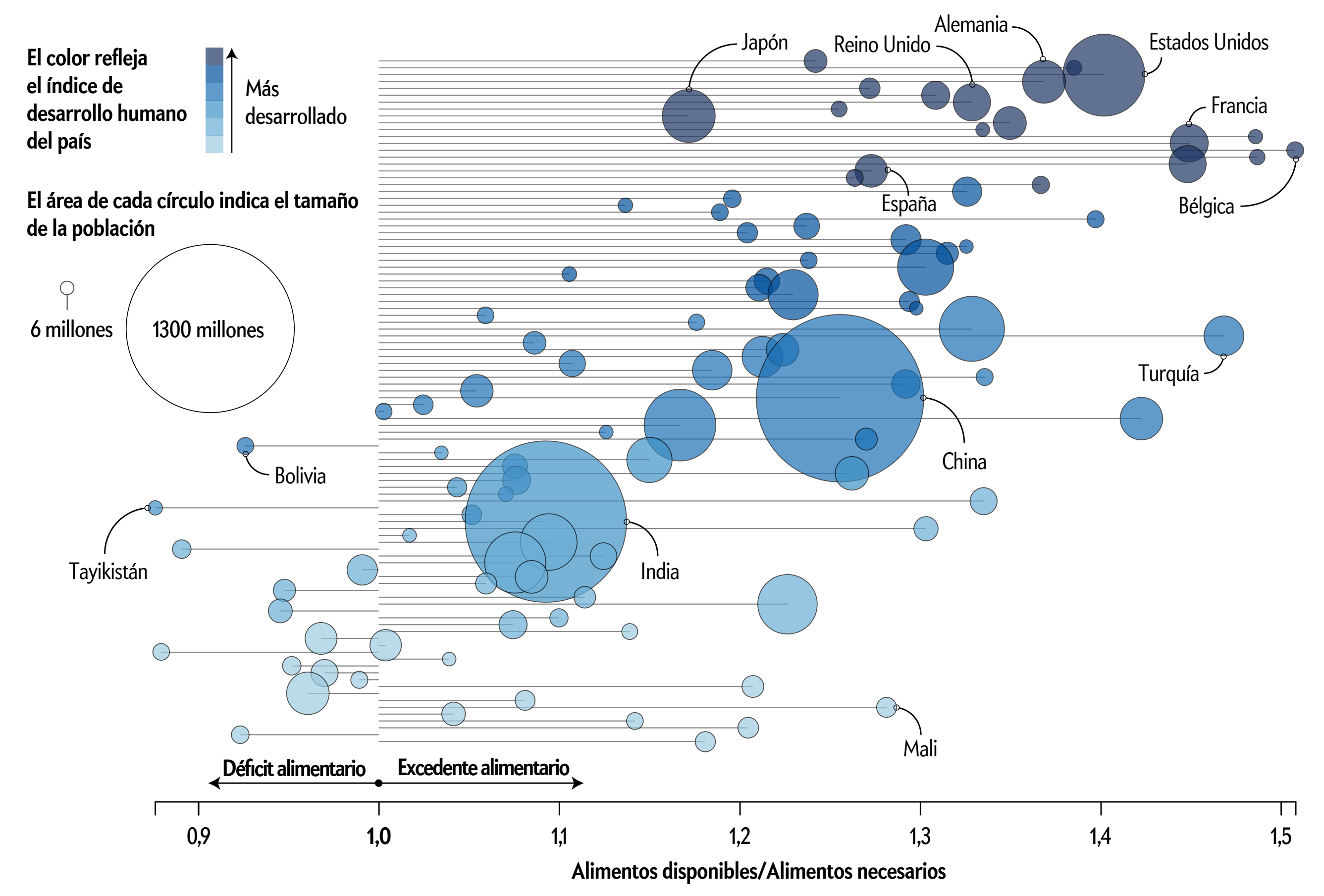
Con todo, esa sobreestimación no debilita el resultado del estudio, asegura Matti Kummu, profesor de ingeniería civil y ambiental de la Universidad Aalto, en Finlandia, quien no participó en el estudio. «Puede que el excedente alimentario sea una estimación simplista del desperdicio de comida, pero no es una mala estimación.»

Que se produzca más comida de la necesaria tiene, por otro lado, un aspecto positivo: si todos esos alimentos no acabasen en la basura, sería posible alimentar a los 9000 millones de personas que se calcula que poblarán el mundo en 2050 sin necesidad de lograr heroicos aumentos en la producción agrícola.

—*Prachi Patel*

Desperdiciar alimentos: una práctica común en todo el mundo

Cada círculo corresponde a un país. La posición horizontal indica el excedente (*hacia la derecha*) o el déficit (*hacia la izquierda*) alimentario de cada nación. Los países representados se encuentran entre los 100 más poblados.



FUENTE: «FOOD SURPLUS AND ITS CLIMATE BURDENS», CEREN HIÇ ET AL. EN *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY*, VOL. 50, N.º 8, 19 DE ABRIL DE 2016; AMANDA MONTAÑEZ (*gráfico*)

NEUROCIENCIA

¿Podemos aprender a olvidar?

Los neurocientíficos comienzan a entender cómo controla el cerebro su propio centro de la memoria

Tras un acto reflejo para agarrar la sartén que cae del fogón, uno es capaz de retirar la mano en el último momento para evitar quemaduras. Esto es así porque el control ejecutivo del cerebro puede intervenir para frenar una cadena de órdenes automáticas. Nuevos datos indican que lo mismo puede suceder en el reflejo de la memoria y que el cerebro puede detener la recuperación espontánea de recuerdos potencialmente dolorosos.

Dentro del cerebro, los recuerdos se asientan en una red de información interconectada. Como resultado, un recuerdo puede desencadenar otro, haciéndolo emerger a la superficie sin ningún esfuerzo consciente. «Cuando rememoramos un suceso u objeto, la respuesta automática de la mente es ayudarnos presentándonos todo aquello que se asocia con él», comenta Michael Anderson, neurocientífico de la Universidad de Cambridge. «Pero a veces recordamos cosas en las que preferiríamos no pensar.»



THOMAS FUCHS; CENTRO DE CULTURA CONTEMPORÁNEA DE BARCELONA (*exposición*)

Sin embargo, los humanos no estamos indefensos ante este proceso. Los estudios de imagen previos sugieren que las áreas frontales del cerebro pueden disminuir la actividad del hipocampo, una estructura crucial para la memoria, y, por tanto, pueden suprimir la recuperación de los recuerdos. En un esfuerzo por ahondar en la cuestión, Anderson y sus colaboradores investigaron recientemente lo que sucede después de suprimir el hipocampo. Pidieron a 381 estudiantes universitarios que aprendieran pares de palabras vagamente relacionadas. Más tarde, se les mostró una palabra y se les pidió que recordaran la otra; o que hicieran lo contrario y, de forma activa, no pensaran en la otra palabra. A veces, entre estas tareas se les presentaba imágenes inusuales, como un pavo real en un aparcamiento.

> Los resultados pueden incluso explicar por qué algunas personas que han experimentado un trauma tienen poca memoria de los acontecimientos cotidianos

Como se describe en *Nature Communications*, los investigadores hallaron que la capacidad de los participantes para evocar más tarde los pavos reales y otras imágenes absurdas fue un 40 por ciento inferior si habían sido instruidos para suprimir el recuerdo de las palabras antes o después de ver las imágenes, en comparación con los ensayos en los que se les había pedido recordar las palabras. El hallazgo aporta nuevas pruebas de que existe un mecanismo de control de la memoria y sugiere que tratar de olvidar activamente un recuerdo en particular puede afectar negativamente a la memoria general. Los investigadores denominan el fenómeno «sombra amnésica», porque aparentemente bloquea el recuerdo de acontecimientos no relacionados que suceden próximos al momento en que disminuye la actividad del hipocampo. Los resultados pueden incluso explicar por qué algunas personas que han sufrido traumas (y luego trataron de olvidarlos) presentan poca memoria de los acontecimientos diarios, según opinan expertos no implicados en el estudio.

Salvo la amnesia temporal, la supresión de recuerdos a la carta podría ser una habilidad útil, apunta Anderson. Es por ello que él y su colaboradora Ana Catarino están estudiando si es posible entrenar a personas en el arte de la supresión: actualmente están llevando a cabo un experimento en el que monitorizan la actividad cerebral de los participantes en tiempo real, a la vez que les van informando verbalmente sobre cómo disminuye la actividad del hipocampo. Ambos proponen que los resultados podrían ayudar a algunas personas a aprender mejor a olvidar selectivamente el pasado, una habilidad que podría aliviar particularmente el dolor de las personas con trastorno de estrés postraumático. —*Bahar Gholipour*

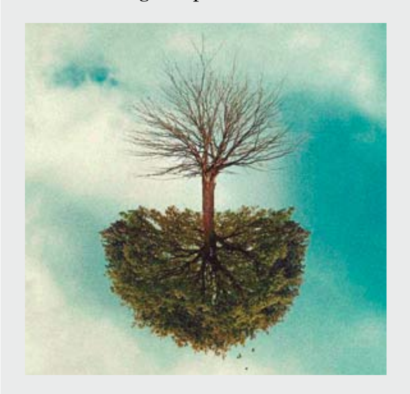
AGENDA

EXPOSICIONES

Arte y naturaleza en la prehistoria: La colección de calcos de arte rupestre del MNCN
Museo de la Evolución Humana
Burgos
www.museoevolucionhumana.com

Cuando la Tierra tiembla: Terremotos y volcanes
Museo de la Ciencia
Valladolid
www.museocienciavalladolid.es

La máquina de pensar: Ramon Llull y el *ars combinatoria*
Centro de Cultura Contemporánea de Barcelona
Barcelona
www.cccb.org > exposiciones



***Spinosaurus*, el gigante perdido del Cretáceo**
Museo de Ciencias Naturales
Barcelona
museuciencies.cat > exposiciones

OTROS

13 de agosto
Observación astronómica en MUNCYT
Museo Nacional de Ciencia y Tecnología
Alcobendas
www.muncyt.es > actividades

Hasta el 15 de agosto – Concurso de fotografía
Medclic Ocean Photo Contest
Tema: el mar y los océanos
Para adultos y menores de 18 años
Sistema de Observación y Predicción Costero de las Islas Baleares
www.medclicphoto.es

Hasta el 30 de agosto – Actividades
Un día de verano en el MNCN
Actividades y talleres para niños de entre 5 y 12 años
Museo Nacional de Ciencias Naturales
Madrid
www.mncn.csic.es > actividades

GEOLOGÍA

Erupciones volcánicas y extinciones masivas

Nuevos estudios apuntalan la idea de que cuatro de las cinco grandes extinciones acontecidas en la Tierra fueron provocadas por descomunales eyecciones de lava

HOWARD LEE

Las cinco grandes extinciones de la historia de nuestro planeta han sido atribuidas en distintos momentos a asteroides, gases de origen microbiano o erupciones volcánicas. Dichas catástrofes acabaron con la mayoría de las plantas y animales de la Tierra; entre ellos los dinosaurios, hace 66 millones de años. Ahora, nuevos datos parecen confirmar el papel de las erupciones volcánicas en esos cataclismos. Según varias dataciones recientes, cuatro de las cinco extinciones masivas coincidieron con colosales eventos eruptivos que desencadenaron cambios letales en la atmósfera.

Hace 250 millones de años, la vida sucumbió ante la extinción pérmica, responsable de la desaparición de más del 95 por ciento de las especies marinas y del 70 por ciento de las terrestres. Hacia la misma época se produjo también una intensa actividad volcánica en la región donde hoy se encuentran los traps (formaciones volcánicas de basalto) de Siberia. A fin de averiguar si dicha actividad comenzó antes de la extinción y pudo haberla causado, los geocronólogos Seth Burgess y Samuel Bowring, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y sus colaboradores viajaron hace poco a la zona para datar los acontecimientos.

Los expertos analizaron los diminutos cristales de zircón y perovskita contenidos en las rocas emitidas en las erupciones. Una vez enfriados en la superficie terrestre, el uranio que contienen se desintegra en plomo a velocidad constante, por lo que la proporción entre ambos elementos permite estimar la antigüedad de la erupción. Según los investigadores, cuyos resultados fueron publicados en agosto de 2015 en *Science Advances*, la mayoría de las rocas comenzaron a aflorar a la superficie tan solo 300.000 años antes del punto álgido de la extinción. Los geoquímicos también han hallado indicios de que en aquella época se incorporó a la atmósfera una ingente cantidad de dióxido de carbono —otra consecuencia letal de las erupciones—, un suceso que volvió a repetirse durante las extinciones acaecidas a finales del Devónico, el Triásico y el Cretácico.

En ninguno de estos casos hablamos de erupciones normales, sino de explosiones ocurridas en vastas superficies conocidas como «grandes provincias ígneas»: zonas plagadas de centros eruptivos y cuya extensión puede alcanzar miles de kilómetros. Sus vestigios forman hoy gigantescas áreas de lava solidificada en zonas remotas de Asia y otras regiones continentales. Las erupciones producidas en ellas revistieron proporciones mastodónticas: el magma se expulsaba en forma de fuentes de más de un kilómetro de altura, la lava formaba largos ríos y una abrasadora niebla sulfurosa se extendía a lo largo de kilómetros. Pero no fueron la lava ni la ceniza las responsables del calificativo «masivo» de dichas extinciones. Los verdaderos causantes de la espiral de destrucción fueron el dióxido de azufre y el dióxido de carbono.

Algunas de las nuevas dataciones han llevado al geofísico Mark Richards, de la Universidad de California en Berkeley, y al geólogo Walter Alvarez, conocido por desarrollar la teoría de que fue el impacto de un asteroide lo que acabó con los dinosaurios, a refinar dicha hipótesis. En un artículo publicado en abril de 2015 en *The Geological Society of America Bulletin*, su equipo de investigación argumentó que la energía liberada por el asteroide aceleró las erupciones más violentas del Cretácico. Por tanto, a diferencia de los dinosaurios, la teoría del impacto todavía sigue viva.

—Howard Lee

PARA SABER MÁS

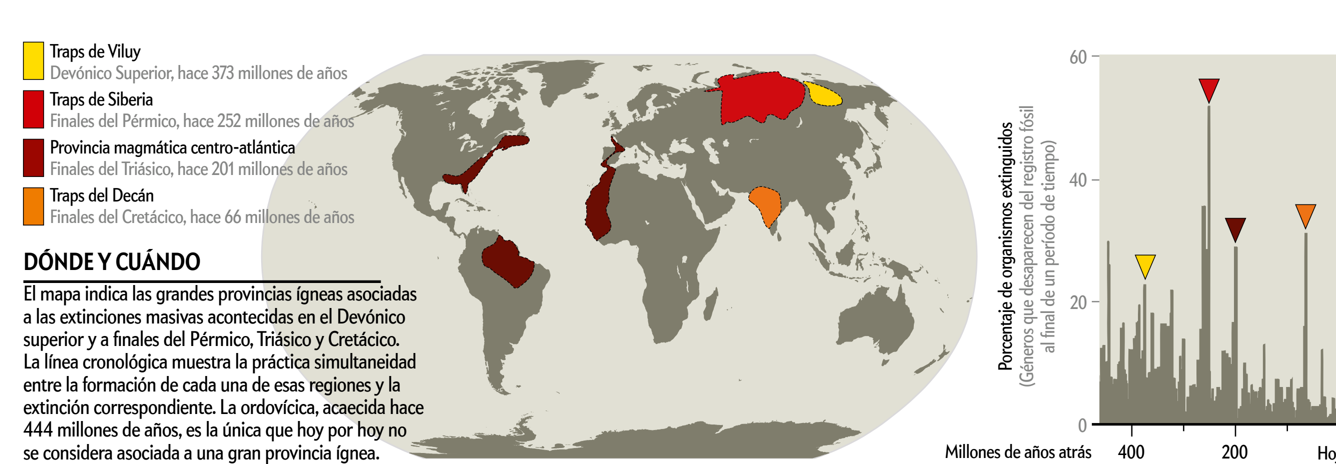
Triggering of the largest Deccan eruptions by the Chicxulub impact. Mark Richards et al. en *The Geological Society of America Bulletin*, vol. 127, n.os 11-12, págs. 1507-1520, abril de 2015.

High-precision geochronology confirms voluminous magmatism before, during, and after Earth's most severe extinction. Seth D. Burgess y S. A. Bowring en *Science Advances*, vol. 1, n.º 7, art. e1500470, agosto de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Impacto desde las profundidades. Peter D. Ward en *IyC*, diciembre de 2006.

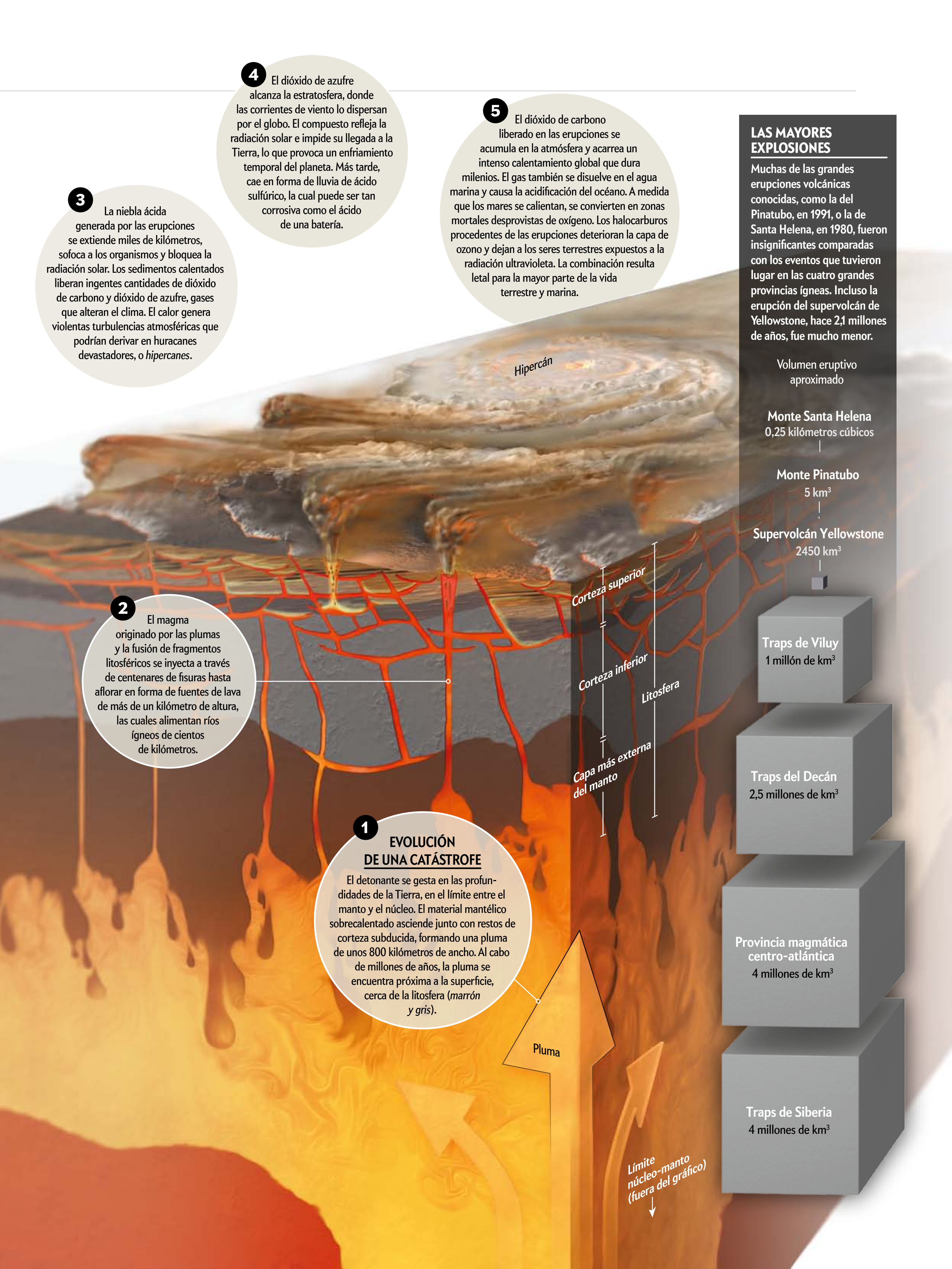
¿Qué causó la extinción de los dinosaurios? Stephen Brusatte en *IyC*, febrero de 2016.



DÓNDE Y CUÁNDO

El mapa indica las grandes provincias ígneas asociadas a las extinciones masivas acontecidas en el Devónico superior y a finales del Pérmico, Triásico y Cretácico. La línea cronológica muestra la práctica simultaneidad entre la formación de cada una de esas regiones y la extinción correspondiente. La ordovícica, acaecida hace 444 millones de años, es la única que hoy por hoy no se considera asociada a una gran provincia ígnea.

FUENTES: «CYCLES IN FOSSIL DIVERSITY», ROBERT A. ROHDE Y RICHARD A. MULLER EN *NATURE*, VOL. 434, MARZO DE 2005 (INFORMACIÓN SUPLEMENTARIA) (*gráfico de extinciones*); «LARGE IGNEOUS PROVINCES AND SILICIC LARGE IGNEOUS PROVINCES: PROGRESS IN OUR UNDERSTANDING OVER THE LAST 25 YEARS», SCOTT E. BRYAN Y LUCA FERRARI EN *GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA BULLETIN*, VOL. 125, N.OS 7-8, JULIO DE 2013 (*mapa*); VOLCANOES.USGS.GOV Y «LARGE IGNEOUS PROVINCES AND MASS EXTINCTIONS: AN UPDATE», DAVID P. G. BOND Y PAUL B. WIGNALL EN *GSA SPECIAL PAPERS*, VOL. 505, 2014 (*volúmenes eruptivos*).


4
El dióxido de azufre alcanza la estratosfera, donde las corrientes de viento lo dispersan por el globo. El compuesto refleja la radiación solar e impide su llegada a la Tierra, lo que provoca un enfriamiento temporal del planeta. Más tarde, cae en forma de lluvia de ácido sulfúrico, la cual puede ser tan corrosiva como el ácido de una batería.
5
El dióxido de carbono liberado en las erupciones se acumula en la atmósfera y acarrea un intenso calentamiento global que dura milenios. El gas también se disuelve en el agua marina y causa la acidificación del océano. A medida que los mares se calientan, se convierten en zonas mortales desprovistas de oxígeno. Los halocarburos procedentes de las erupciones deterioran la capa de ozono y dejan a los seres terrestres expuestos a la radiación ultravioleta. La combinación resulta letal para la mayor parte de la vida terrestre y marina.
3
La niebla ácida generada por las erupciones se extiende miles de kilómetros, sofoca a los organismos y bloquea la radiación solar. Los sedimentos calentados liberan ingentes cantidades de dióxido de carbono y dióxido de azufre, gases que alteran el clima. El calor genera violentas turbulencias atmosféricas que podrían derivar en huracanes devastadores, o *hipercanes*.
Hipercán
2
El magma originado por las plumas y la fusión de fragmentos litosféricos se inyecta a través de centenares de fisuras hasta aflorar en forma de fuentes de lava de más de un kilómetro de altura, las cuales alimentan ríos ígneos de cientos de kilómetros.
Corteza superior
Corteza inferior
Litosfera
Capa más externa del manto
1
EVOLUCIÓN DE UNA CATÁSTROFE
El detonante se gesta en las profundidades de la Tierra, en el límite entre el manto y el núcleo. El material mantélico sobrecalentado asciende junto con restos de corteza subducida, formando una pluma de unos 800 kilómetros de ancho. Al cabo de millones de años, la pluma se encuentra próxima a la superficie, cerca de la litosfera (*marrón y gris*).
Pluma
Límite núcleo-manto (fuera del gráfico)
LAS MAYORES EXPLOSIONES
Muchas de las grandes erupciones volcánicas conocidas, como la del Pinatubo, en 1991, o la de Santa Helena, en 1980, fueron insignificantes comparadas con los eventos que tuvieron lugar en las cuatro grandes provincias ígneas. Incluso la erupción del supervolcán de Yellowstone, hace 2,1 millones de años, fue mucho menor.
Volumen eruptivo aproximado
Monte Santa Helena
0,25 kilómetros cúbicos
Monte Pinatubo
5 km^3
Supervolcán Yellowstone
2450 km^3
Traps de Viluy
1 millón de km^3
Traps del Decán
2,5 millones de km^3
Provincia magmática centro-atlántica
4 millones de km^3
Traps de Siberia
4 millones de km^3

HISTORIA DE LA COMPUTACIÓN

Lo que Church y Turing ya sabían sobre mi portátil

Los dos trabajos que marcaron el origen de la informática acaban de cumplir 80 años. Hoy, sus hallazgos siguen guiando la investigación en ingeniería y análisis de programas

SALVADOR LUCAS

Con el advenimiento de las redes inalámbricas, nos hemos acostumbrado a la periódica —y, a menudo, inesperada— actualización de las aplicaciones que usan nuestros teléfonos móviles, tabletas y ordenadores. Con frecuencia anuncian la instalación de nuevas funcionalidades o la corrección de errores detectados. Saludamos con alegría las primeras, pero tal vez nos quedemos pensativos ante las segundas. ¿Errores «detectados»? ¿No podían haberse identificado antes de la primera distribución del programa para evitar así cualquier problema posterior?

Por desgracia, la respuesta a esta pregunta es negativa. Y hace mucho que se sabe: ya en los años treinta del siglo pasado, dos de los padres de la informática intuyeron cuáles serían nuestros problemas actuales.

De Hilbert a los fallos de programación

En la segunda década del siglo xx, el célebre matemático alemán David Hilbert propuso utilizar la lógica como formalismo universal para expresar las afirmaciones matemáticas y demostrarlas. En este programa de «mecanización» de la matemática, uno de los retos planteados por Hilbert fue lo que daría en llamarse «problema de la decisión»: hallar un método efectivo para establecer, en un número finito de pasos, si una determinada fórmula lógica es cierta o no. Sin embargo, Hilbert no definió con precisión qué entendía por «método efectivo».

En abril de 1936, Alonzo Church, matemático de la Universidad de Princeton, avanzó la idea de que su cálculo lambda —un formalismo que había concebido poco antes para modelizar los aspectos esenciales de las funciones en matemáticas— capturaba la noción de método efectivo de Hilbert. En mayo de ese mismo año, Alan Turing, recién licenciado en Cambridge, introdujo lo que hoy conocemos como máquina de Turing (MT) y argumentó que esta también se correspondía con la escurridiza idea del matemático alemán. Y en agosto, hace justo 80 años, Turing demostró que su máquina y el cálculo lambda definían métodos efectivos equivalentes.

Una MT es un dispositivo abstracto capaz de adoptar un número finito de estados internos y dotado de ciertas reglas de transición. La MT cuenta con una cinta infinita dividida en casillas, las cuales pueden estar en blanco o contener un símbolo (por ejemplo, 0 o 1). Un cabezal de lectura y escritura accede a una de las casillas y, en función del estado de la máquina en ese momento y del contenido de la casilla, cambia el estado interno, modifica el símbolo de la casilla y el cabezal se desplaza a la derecha o a la izquierda.

La *tesis de Church-Turing* es el postulado que sostiene que el cálculo lambda o la máquina de Turing constituyen el modelo abstracto de cualquier método efectivo de cálculo; es decir, de cualquier máquina de cómputo concebible. Si bien se trata de una hipótesis carente de demostración formal —ya que no existe una definición precisa de «método efectivo» con la que contrastarla—, a partir de ella Church y Turing concluyeron que el proyecto de Hilbert era inviable. Turing había demostrado que, dada una MT genérica, sería imposible construir otra MT capaz de determinar si la primera escribirá algo en la cinta o no. Turing también explicó cómo asociar una fórmula lógica a cada MT de manera que si (como Hilbert conjeturaba) hubiese un método efectivo capaz de demostrar la verdad o falsedad de cualquier fórmula lógica, entonces también sería posible saber si una MT genérica escribirá algo en la cinta o no: algo que Turing había demostrado imposible.



COMPUTADORA UNIVERSAL: Una máquina de Turing puede entenderse como un dispositivo que lee y escribe símbolos en una cinta de acuerdo con ciertas reglas (*centro*). La tesis de Church-Turing establece que todo cómputo realizable puede llevarse a cabo con la máquina de Turing adecuada. Como tales, estos dispositivos proporcionan un modelo abstracto para comprender y analizar el funcionamiento de los modernos aparatos digitales, desde los relojes inteligentes hasta los superordenadores.

LUCY READING-IKKANDA (*máquina de Turing*); © ISTOCKPHOTO/MONICADDO/ASKOLD ROMANOV/TOUC/JACEK KITA/JULICHKA/DESIGNYMK/MACROVECTOR (*ilustraciones de izquierda a derecha*)

Sin embargo, aquel mazazo al proyecto de Hilbert dejó un valioso legado: la máquina universal de Turing (MUT). Este dispositivo es una MT diseñada para simular el comportamiento de cualquier otra, lo que siempre puede conseguirse si los símbolos escritos en la cinta se escogen de la manera adecuada. Según el propio Turing, la MT simulada hace las veces de «programa» ejecutado por la MUT. Esta propiedad convertiría a la MUT en el embrión conceptual de los ordenadores modernos. En 1946, Arthur Burks, Herman Goldstine y John von Neumann, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, describieron el diseño lógico de un instrumento de cómputo electrónico basado en la MUT. Hoy, ese modelo sigue subyaciendo a todos nuestros relojes inteligentes, teléfonos y ordenadores.

Así pues, si la MUT proporciona el modelo abstracto de cualquier ordenador concebible, y si un programa dado puede verse como una MT particular, los límites al problema de la decisión descubiertos por Church y Turing implican que no siempre será posible verificar el funcionamiento del *software* de nuestros dispositivos. Por tanto, tampoco podremos detectar con antelación cualquier error.

EL CÁLCULO LAMBDA DE CHURCH

El esfuerzo de Church por capturar la idea de método efectivo de Hilbert se centró en modelizar el proceso de combinar funciones para obtener otras nuevas, un enfoque que fructificó a principios de los años treinta con la introducción de su cálculo lambda. En agosto de 1936, Turing demostró que la noción de computabilidad implícita en una máquina de Turing resultaba equivalente al cálculo lambda de Church.

El rasgo esencial de una función matemática es que devuelve un resultado a partir de los valores que toman una serie de argumentos. En el cálculo lambda, dichos argumentos se expresan como variables: x, y, etcétera. Dada una variable x y una expresión genérica M, en la que puede aparecer x, la notación ($\lambda x.M$) representa una función cuyo valor queda condicionado por el del argumento x (el símbolo λ puede entenderse como un «indicador» de cuál es el argumento de la función). Este tipo de expresiones son conocidas como «funciones sin nombre». Por último, una expresión N —supongamos que de la forma ($\lambda x.M$)— puede aplicarse a un argumento genérico P sin más que yuxtaponerlos: (NP). En tal caso, la expresión P sería «llevada» por el argumento x a los lugares de N donde hubiera una x. Church mostró que esta sencilla abstracción del concepto de función permitía representar los valores booleanos, los números naturales y realizar las operaciones aritméticas, lógicas y de decisión fundamentales.

El cálculo lambda de Church inspiró algunos de los primeros lenguajes de programación, como Lisp, concebido en 1958, y fundamenta los lenguajes funcionales modernos, como Haskell, Scheme y la familia de lenguajes ML, entre otros. Incluso Java, el popular lenguaje de programación para aplicaciones orientadas a dispositivos móviles, permite en sus últimas versiones que los programas utilicen funciones sin nombre.

El compilador verificador

Para describir los problemas que deseamos resolver con un ordenador se usan los lenguajes de programación. Estos permiten expresar las órdenes que deberá ejecutar la máquina mediante enunciados que incluyen palabras del lenguaje natural (típicamente del inglés) y unas reglas de construcción sencillas. El encargado de traducir esas instrucciones «de alto nivel» en órdenes interpretables por la computadora es un programa especial denominado compilador.

Puesto que los programas informáticos se escriben en un lenguaje con unas normas de construcción muy precisas, y dado que su comportamiento durante la ejecución está gobernado por reglas igualmente precisas, resulta natural emplear la lógica para deducir cuáles deberían ser los resultados del programa ante ciertas entradas, así como sus propiedades de ejecución. En principio, un «compilador verificador» podría ayudarnos a construir un *software* que garantizase los requisitos deseados. También podría analizar otro tipo de comportamientos del programa, como estimar cuánta memoria se necesitará para ejecutarlo o proporcionar una cota superior al tiempo que tardará en llevar a cabo el cómputo solicitado.

No obstante, como consecuencia de la tesis de Church-Turing y de su solución (negativa) al problema de la decisión de Hilbert, sabemos que es imposible diseñar un programa verificador capaz de determinar, en tiempo finito y para cualquier propiedad considerada, si un programa dado exhibirá o no dicha propiedad.

Un ejemplo clásico lo hallamos en el problema de la parada. Este propone determinar, mediante un programa informático adecuado, si otro programa se detendrá o no ante cualquier posible entrada; es decir, si se trata de un programa terminante. Puede demostrarse que, en general, este problema carece de solución. Por esa razón, decimos que la terminación de programas constituye una propiedad indecidible.

Con todo, lo anterior no ha frenado el desarrollo de técnicas de análisis y verificación de programas ni los intentos para automatizarlas. En 2003, Tony Hoare, investigador de Microsoft Research y pionero en el campo de la verificación de programas, propuso recuperar la idea, abandonada en los años setenta, de construir un compilador verificador como uno de los grandes retos en informática para los próximos años. Dicha propuesta se basa en que nada impide aspirar a soluciones parciales de los problemas de análisis y verificación. Esto puede lograrse imponiendo restricciones sobre los programas P considerados (por ejemplo, limitando la expresividad del lenguaje de programación) o acotando la clase de propiedades que deseamos verificar.

Por ejemplo, el uso de fórmulas proposicionales (combinaciones de variables que solo pueden adoptar el valor «cierto» o «falso», ligadas entre sí mediante los conectores lógicos de conjunción, disyunción y negación) ha ofrecido buenas posibilidades para automatizar el análisis y la verificación de programas gracias al desarrollo reciente de varias técnicas para resolver el problema de la satisfacibilidad proposicional, conocido en la jerga informática como SAT. El reto de Hoare fue recogido casi de inmediato por diversos investigadores y empresas de desarrollo de *software*, que desde entonces han trabajado en él. Entre otras iniciativas actuales cabe destacar el proyecto CompCert, liderado por Xavier Leroy, del Instituto Nacional de Investigación en Informática y Automatización (INRIA) francés.

Más allá de la computación

Ochenta años después, la tesis de Church-Turing sigue siendo de actualidad por diversos motivos. En primer lugar, no es aceptada por todos los teóricos de la

computación. En este sentido, algunos investigadores hablan de «hipercomputación» para referirse a aquellos modelos de cómputo que estarían más allá de la MT; una idea que, en ocasiones, ha sido objeto de acalorados debates.

Pero, además, la tesis de Church-Turing ha traspasado las fronteras de la informática clásica y ha llamado a las puertas de las ciencias naturales; en particular, de la biología y de la física. Algunos autores sostienen que los sistemas biológicos obedecen la denominada tesis de Church-Turing «fuerte», o «física», según la cual todo proceso físicamente realizable debería ser computable con una MT. Otros, sin ir tan lejos, afirman que la MT proporciona un modelo adecuado para muchos de los procesos que tienen lugar a nivel celular o subcelular. Finalmente, investigadores como Jack Copeland y Richard Sylvan, de la Universidad de Canterbury, o el físico teórico Roger Penrose, de la de Oxford, han atribuido a algunos sistemas biológicos, como el cerebro humano, capacidades de cómputo que excederían a las de una MT.

Como intrépidos exploradores de un territorio ignoto, Church y Turing expandieron el horizonte científico y mostraron el camino hacia una disciplina sin la cual hoy no entenderíamos el mundo que nos rodea: la informática. Sus descubrimientos siguen inspirándonos y son fuente constante de nuevos avances en el camino hacia la construcción de un *software* más robusto y fiable. En un alarde de clarividencia, Church y Turing demostraron saber mucho sobre mi portátil.

—Salvador Lucas
Departamento de sistemas informáticos y computación
Universidad Politécnica de Valencia

PARA SABER MÁS

An unsolvable problem of elementary number theory. A. Church en *American Journal of Mathematics*, vol. 58, n.º 2, págs. 345-363, abril de 1936.
On computable numbers, with an application to the *Entscheidungsproblem*. Alan M. Turing en *Proceedings of the London Mathematical Society*, vol. 42, n.º 2, págs. 230-265, 1936-37.
The verifying compiler: A grand challenge for computing research. Tony Hoare en *Journal of the Association for Computing Machinery*, vol. 50, n.º1, págs. 63-69, enero de 2003.

EN NUESTRO ARCHIVO

La ciencia después de Alan Turing. VV. AA. Colección *Temas de IyC* n.º 68, 2012.

SOSTENIBILIDAD

La humanidad consume más agua de la que se creía

Según un cálculo reciente que tiene en cuenta la evaporación de los embalses, ya habríamos superado el límite planetario de consumo de agua

FERNANDO JARAMILLO

La humanidad y todos los ecosistemas del planeta dependemos del agua dulce para sobrevivir. Los humanos la empleamos para nuestro propio consumo y aseo, así como para generar energía. También la utilizamos para regar los cultivos, ya sean de regadío (con agua superficial o subterránea) o de secano (con agua de lluvia), y para dar de beber y comer a los animales en los cuales basamos nuestra alimentación.

El consumo de agua ha venido incrementándose gradualmente con el crecimiento de la población y la mayor demanda de alimentos y energía. Distintos autores han calculado la cantidad de agua que utilizamos los humanos y se han preguntado hasta qué punto estamos agotando los recursos hídricos del planeta. Los resultados obtenidos son discrepantes. Ahora, un estudio publicado por el autor en *Science* el pasado diciembre concluye que ya habríamos superado el límite planetario sostenible de consumo de agua.

Huella hídrica

Para calcular la cantidad de agua que consumimos suele tenerse en cuenta el agua que tomamos de la lluvia, denominada agua verde, y la que extraemos de los recursos hídricos superficiales o subterráneos (ríos, lagos y acuíferos), denominada agua azul.

El consumo de agua azul y agua verde puede ilustrarse con el ejemplo de un sistema de riego que se abastece de un río para suplir de agua a un cultivo de tomates en España. El agua extraída del río, que corresponde a agua azul, es dispersada sobre la tierra del cultivo. La mayor parte de ella será absorbida por las raíces de las plantas de tomate para crecer y será transpirada a través de sus hojas, fenómeno conocido como evapotranspiración; o bien se evaporará directamente desde la tierra donde crecen las plantas. Se trata de agua azul consumida por la actividad agrícola. Pero, si llueve, las plantas del cultivo tomarán también el agua pluvial de la tierra húmeda y la transpirarán, lo que corresponderá a consumo de agua verde.

El consumo total de agua (azul y verde) de la humanidad se estimaba hasta hace poco en 7709 kilómetros cúbicos al año, según los cálculos realizados por Arjen Y. Hoekstra y Mesfin M. Mekonnen, de la Universidad de Twente. Pero, además, a esta cantidad hay que añadirle un consumo derivado de la contaminación del agua, denominada agua gris. El valor final que se obtiene entonces es la huella hídrica, que los mismos autores han valorado en un total de 9087 kilómetros cúbicos al año. Así pues, la huella hídrica de la humanidad equivale a consumir el volumen de agua del mar Báltico en poco más de dos años. La mayor parte de este consumo (84 por ciento) corresponde al sector agrícola y es en su mayoría (87 por ciento) de agua verde. Por el contrario, el consumo de los hogares no supera el 5 por ciento del total de la huella hídrica.

Por consiguiente, si queremos ahorrar agua a escala local, deberíamos pensar no solo en el tiempo que permanecemos bajo la ducha, sino también en nuestra alimentación; en concreto, deberíamos tener en cuenta de dónde provienen los alimentos que consumimos a diario y cuánta agua se requiere para producirlos.

Como si estos valores de consumo no fueran lo bastante elevados, el estudio publicado por el autor en *Science* ha llamado la atención sobre el consumo de agua asociado a los embalses, un valor que hasta la fecha no se había tenido en cuenta o era subestimado. Los embalses se utilizan en todo el mundo para regular y almacenar agua para el consumo, o para generar electricidad. De la superficie de estos embalses se evapora una gran cantidad de agua, que va a parar directamente a la atmósfera. Además, alrededor de estos lagos artificiales el nivel freático asciende notablemente, lo que aumenta la disponibilidad de agua para la vegetación circundante y se incrementa así la evapotranspiración de las plantas. A estos efectos se suman cambios hidroclimáticos a escala local que también pueden promover la evapotranspiración. Al tener en cuenta el consumo de agua asociado a los embalses, el autor ha calculado que la huella hídrica de la humanidad es en realidad al menos un 20 por ciento superior al valor estimado por Hoekstra y Mekonnen. Es decir, asciende como mínimo a 10.700 kilómetros cúbicos al año. Este incremento en el valor de la huella hídrica equivale al volumen del lago Ontario.



EL AGUA DE LOS EMBALSES no solo se gasta para el riego agrícola y el consumo humano; se pierde también debido a la evaporación directa que se produce en su superficie y a la evapotranspiración de la vegetación circundante. En la imagen, embalse de Aldeadávila de la Ribera, en Salamanca.

Límite planetario superado

Pero ¿cuán sostenible es este nivel del consumo total? En otras palabras, ¿está este consumo afectando la estabilidad del sistema global, provocando cambios irreparables en los organismos vivos o comprometiendo el acceso al agua de las generaciones futuras? En realidad, esta pregunta solo puede responderse a escalas más pequeñas, analizando el equilibrio entre consumo y disponibilidad de agua en cada cuenca hidrográfica o región. También es necesario comprender cuál es el límite de disponibilidad de agua que pueden soportar las especies acuáticas que viven en las fuentes hídricas que estamos explotando.

Aunque abstractas y no carentes de debate, existen iniciativas que han intentado definir la sostenibilidad del nivel de consumo del agua a escala global. La más conocida es la teoría de los límites planetarios, definida en 2009 por Johan Rockström, del Centro de Resiliencia de Estocolmo, y sus colaboradores, la cual contempla un límite sostenible para cada uno de los elementos que comprenden el sistema de la Tierra [*véase* «Límites de un planeta sano», por Jonathan Foley; Investigación y Ciencia, junio de 2010]. Los autores de esta teoría establecen que el límite de consumo de agua azul que define las «condiciones habitables» para la humanidad en el planeta es de 4000 kilómetros cúbicos al año. Aunque los consumos de agua azul estimados por Hoekstra y Mekonnen y por Rockström no alcanzan dicho límite, de acuerdo con los cálculos del autor, que tienen en cuenta el agua evaporada de los embalses y el agua evapotranspirada por la vegetación, ya habríamos superado los 4000 kilómetros cúbicos al año de consumo de agua azul.

En la actualidad, no podemos responder a la pregunta sobre las consecuencias que tiene haber sobrepasado este límite planetario. Resulta sorprendente lo poco que conocemos sobre el ciclo del agua y las discrepancias existentes en cuanto a los cálculos de nuestro consumo, si se tiene en cuenta la importancia de dicho recurso para nuestra supervivencia. Hoy las preocupaciones se centran sobre todo en el impacto del cambio climático y del calentamiento global sobre los recursos hídricos del planeta, lo que ha desviado la atención sobre cuál es el efecto directo de nuestras actividades sobre el ciclo y la disponibilidad natural del agua. Entender las implicaciones de estos niveles de consumo debe ser una prioridad científica para conocer los límites de nuestro crecimiento como especie.

—Fernando Jaramillo
Departamento de geografía física
Centro de Resiliencia de Estocolmo
Universidad de Estocolmo

PARA SABER MÁS

A safe operating space for humanity. J. Rockström et al. en *Nature*, vol. 461, págs. 472-475, septiembre de 2009.
The water footprint of humanity. A. Y. Hoekstra y M. M. Mekonnen en *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA.*, vol. 109, págs. 3232-3237, febrero de 2012.
Local flow regulation and irrigation raise global human water consumption and footprint. F. Jaramillo y G. Destouni en *Science*, vol. 350, págs. 1248-1251, diciembre de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

La crisis del agua. Peter Rogers en *IyC*, octubre de 2008.
Límites de un planeta sano. Jonathan Foley en *IyC*, junio de 2010.



EVOLUCIÓN

EL ÉXITO EVOLUTIVO DE LOS M

Hallazgos fósiles recientes revelan que, mucho antes de que un asteroide acabase con la hegemonía de los dinosaurios, los mamíferos ya estaban sentando las bases de su futuro dominio en el planeta

Stephen Brusatte y Zhe-Xi Luo

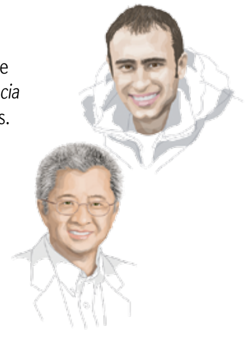


AMÍFEROS

DINOSAURIO PARA CENAR. En China se ha descubierto un fósil de 130 millones de años perteneciente a un mamífero ancestral, *Repenomamus*, cuya caja torácica contenía la osamenta de una cría de psitacosáurido.

Stephen Brusatte es paleontólogo de la Universidad de Edimburgo. Su último artículo para *Investigación y Ciencia* trató sobre las causas de la extinción de los dinosaurios.

Zhe-Xi Luo es paleontólogo de la Universidad de Chicago. Su investigación se centra en la evolución de los primeros mamíferos.



En una tarde invernal a inicios de 1824, el naturalista y teólogo inglés William Buckland se encaminó a la Sociedad Geológica de Londres. La sala bullía de expectación. Buckland era conocido por sus clases efusivas en la Universidad de Oxford, donde se contaba que, vestido con todas sus galas académicas, hacía circular partes de animales y fósiles entre sus devotos estudiantes. Durante años había corrido el rumor de que atesoraba gigantescos huesos fósiles, descubiertos por picapedreros en las canteras de la campiña inglesa. Después de casi una década de estudio, estaba listo para hacerlo público. Explicó a la audiencia que esos huesos pertenecían a un antiguo animal similar a un lagarto pero mucho mayor que cualquier reptil actual. Lo llamó megalosaurio. La multitud quedó embelesada. Buckland había dado a conocer el primer dinosaurio.

Esa tarde fue un momento primordial para la historia de la ciencia que desató una fascinación aún viva por los dinosaurios. Pero lo que a menudo se olvida es que ese mismo día Buckland hizo otro anuncio; de dimensiones mucho menores, pero igual de revolucionario. Durante el análisis del resto de los fósiles hallados junto al megalosaurio en las canteras, estudió el hallazgo «extraordinario» de dos pequeñas fauces de mamífero, del tamaño de las mandíbulas de un ratón. Hasta entonces, los eruditos pensaban que los mamíferos eran más recientes y que surgieron mucho más tarde en la escala geológica, después del ocaso de los lagartos y las salamandras gigantes. Las dos minúsculas mandíbulas poseían los caninos característicos de los mamíferos y constituían el primer indicio de que la historia de esta clase era mucho más antigua.

Esas fauces planteaban una serie de incógnitas: ¿Cuán antiguos eran los mamíferos? ¿Cómo eran y cómo vivieron durante el largo dominio de los dinosaurios? ¿Cómo surgieron sus rasgos (la piel, las glándulas mamarias, el cerebro grande, la dentición compleja y los sentidos aguzados)? ¿Y por qué un grupo —los placentarios, caracterizados por dar a luz crías desarrolladas y que hoy integra más de 5000 especies, desde murciélagos diminutos hasta ballenas colosales— logró conquistar el planeta?

Casi dos siglos después de la conferencia de Buckland, esas preguntas seguían siendo difíciles de responder, dado el escasísimo número de fósiles de esos primeros mamíferos. Pero en el último quincenio se han sucedido numerosos descubrimientos paleontológicos que al fin están permitiendo trazar su evolución, desde las diminutas alimañas que vivían a la sombra del megalosaurio hasta el asombroso abanico actual.

INICIOS HUMILDES

Como tantas dinastías, los mamíferos provienen de una cuna modesta. En el lenguaje de la ciencia, dentro del árbol de la vida, la clase zoológica de los mamíferos engloba a los monotremas (ovíparos), los marsupiales (que acogen a sus crías minúsculas en una bolsa) y los placentarios, así como a todos los descendientes extintos del ancestro común. Los primeros animales cuyo aspecto y comportamiento semejaba el de los mamíferos actuales eran un grupo diverso denominado mamaliaformes, un nombre muy apropiado para designar a los parientes más cercanos de los mamíferos verdaderos. Descendían de los cinodontes, especies primitivas que conservaban muchos caracteres reptilianos.

Los primeros fósiles de mamaliaformes datan de hace unos 210 millones de años, en el Triásico superior (tardío), un momento fascinante de la evolución. Unas decenas de millones de años antes, la mayoría de las formas de vida había desaparecido en una extinción masiva provocada por una fase de vulcanismo que marcó el final del período Pérmico y el inicio del Triásico. La mayoría de los anfibios y reptiles gigantes que dominaron el Pérmico se extinguió y animales de otros grupos aún hoy

EN SÍNTESIS

Los científicos siempre se han preguntado cuándo y de qué forma los mamíferos llegaron a ser los vertebrados dominantes. Pero no habían hallado muchos fósiles al respecto.

En los últimos 15 años se ha sucedido una serie de hallazgos que han brindado información sobre la diversificación y el éxito del grupo y que aclaran el papel desempeñado por la extinción de los dinosaurios.

Los descubrimientos revelan que el origen de los mamíferos es mucho más antiguo de lo concebido y que desarrollaron un conjunto de especializaciones durante la hegemonía de los dinosaurios.

La súbita desaparición de los dinosaurios allanó el camino a los mamíferos placentarios.

PÁGINAS ANTERIORES: ILUSTRACIÓN DE JAMES GURNEY

importantes prosperaron en el vacío que siguió a la hecatombe. Tortugas, lagartos, ranas, cocodrilos, dinosaurios (que con el tiempo evolucionaron hasta convertirse en aves) y los antepasados mamaliaformes de los mamíferos actuales iniciaron su camino evolutivo en ese momento de crisis.

Algunos de los fósiles mejor conservados de mamaliaformes triásicos provienen de la formación rocosa del Fleming Fjord, en la costa oriental de Groenlandia. En los años noventa del siglo XX se halló en ella una gran cantidad de dientes y mandíbulas diminutas que ayudaron a desentrañar el aspecto de los antepasados inmediatos de los mamíferos. Con todo, no son fósiles fáciles de encontrar. El difunto Farish Jenkins, singular paleontólogo de la Universidad Harvard, y su intrépido equipo peinaron estas rocas congeladas en su búsqueda. Jenkins era tan entusiasta y teatral en sus conferencias como Buckland. En sus clases de anatomía, dibujaba minuciosos esquemas de esqueletos y órganos, siempre enfundado en trajes a medida de factura impecable. Antiguo infante de marina, era un jefe intrépido que siempre llevaba consigo un rifle para proteger a su equipo de los osos polares, un peligro constante en esas latitudes.

El equipo de Jenkins descubrió fósiles de tres grandes grupos de mamaliaformes: kuehneotéridos, morganucodontes y haramiyidanos. Todos eran menudos, similares a musarañas y ratones, con rasgos distintivos de los mamíferos. Estaban cubiertos de pelo, que aísla del frío y disipa el calor. La forma de la articulación mandibular y el desarrollo de la musculatura masticatoria del cráneo les otorgaron mayor fuerza en la mordedura y mayor precisión con respecto a los cinodontes. Las cúspides dentales, sobre todo las de los molares posteriores, eran más aptas para masticar.

Los fósiles hallados en Groenlandia y en otros continentes indican que, en paralelo con las innovaciones de la mandíbula, también se produjo un cambio en el desarrollo dental. Los cinodontes tenían dientes de crecimiento continuo, que caían y volvían a salir a lo largo de toda la vida. En cambio, los mamaliaformes tenían nuestro mismo tipo de crecimiento, en el que la dentición de leche es sustituida por la permanente. A pesar de que los humanos nos quejamos de nuestra peculiar dentición ya que cuando caen los dientes adultos no crecen otros nuevos, nuestra forma de desarrollo y sustitución dental está íntimamente ligada con uno de los rasgos distintivos de la biología de los mamíferos. Los jóvenes desdentados o con dientes de leche pueden nutrirse de la leche materna que segregan las glándulas mamarias, que dan nombre al grupo. Por tanto, muy probablemente estos mamaliaformes alimentaban a sus crías del mismo modo que los mamíferos actuales. Este importante cambio evolutivo permitió a las crías crecer más rápido y sobrevivir mejor. El metabolismo acelerado les permitía ser activos en entornos más fríos y, especialmente, en la oscuridad de la noche.

Los primeros mamaliaformes también muestran indicios de otro rasgo clave de los mamíferos, como es una mayor inteligencia y percepción sensorial. En la última década, la aplicación de la tomografía computarizada ha permitido a los paleontólogos explorar detalles de la anatomía interna de los huesos fósiles, como las cavidades cerebrales y las vías nerviosas. Esta técnica ha puesto de manifiesto que los primeros mamaliaformes poseían cerebros enormes en comparación con sus antepasados, sin alcanzar el tamaño propio de los mamíferos actuales. Su cerebro también albergaba grandes bulbos olfativos y regiones auditivas, encargados de recibir la información de los sentidos del olfato y del oído. También eran más voluminosas las regiones responsables de procesar la información táctil de la piel y el pelo. El oído interno había evolucionado rodeándose de hueso macizo, que lo dotaba de mayor sensibilidad y lo aislaba de los ruidos provocados por la masticación.

A pesar de que los primeros mamaliaformes del Triásico estaban empezando a adquirir las destacables características de los mamíferos modernos, no constituían la fauna dominante de la época. Ese puesto lo ostentaban los dinosaurios y los cocodrilos, que habían empezado a adquirir dimensiones monstruosas y ocupaban la cúspide de la pirámide trófica. A pesar de su pequeña talla, los protomamíferos la compensaban con su diversidad. Los últimos estudios llevados a cabo por Pamela Gill, de la Universidad de Bristol, han revelado su sorprendente diversidad adaptativa a la alimentación. Gill y sus colaboradores han recurrido a los haces del sincrotrón para estudiar los dientes de los mamaliaformes y al *software* de ingeniería para modelar su función; han demostrado así que las mandíbulas de los morganucodontes eran lo bastante fuertes para triturar insectos grandes y de caparazón duro, como los escarabajos. Mientras que las gráciles mandíbulas y los dientes delicados de los kuehneotéridos probablemente masticaban gusanos blandos o polillas. Otro análisis realizado por uno de nosotros (Luo) muestra que los haramiyidanos podrían cortar y triturar pequeñas plantas con sus singulares mandíbulas móviles.

LA GRAN EXPLOSIÓN DEL JURÁSICO

La idea clásica sobre la evolución de los mamíferos sostiene que esos protomamíferos no habrían cambiado en decenas de millones de años, durante gran parte de la era Mesozoica (de 252 a 66 millones de años atrás, que abarca los períodos Triásico, Jurásico y Cretácico). Mientras los dinosaurios gozaban de su dominio, los protomamíferos quedaron relegados a una existencia anodina como pequeños insectívoros de hábitos rastreros, ocultos entre la espesura y bajo el suelo. Pero los numerosos descubrimientos de fósiles en yacimientos de todo el mundo rebaten esta imagen. La adaptabilidad de los primeros mamaliaformes se convertiría en una constante durante toda la evolución de los mamíferos, incluido el largo período de coexistencia con los dinosaurios. Esa capacidad de adaptación a los cambios mediante la diversificación parece haber sido la clave de su éxito.

En el caso de los primeros mamaliaformes, sus aguzados sentidos y su fina coordinación motriz (sustentados por un cerebro más voluminoso), aunados con su metabolismo acelerado, les habrían permitido prosperar en el frío y en la oscuridad de la noche. Y esas mismas facultades les habrían ayudado a sobrevivir cuando se produjo una nueva catástrofe. El registro geológico muestra que a caballo del Triásico y del Jurásico, hace unos 200 millones de años, el supercontinente Pangea se desgarró. La gran actividad volcánica desatada en torno a las fisuras generadas por la separación de los continentes envenenó la atmósfera y provocó el colapso de los ecosistemas. Los mamaliaformes lograron sobrevivir al cataclismo y colonizaron nichos ecológicos que resultaron inaccesibles a muchos otros vertebrados coetáneos.

Numerosos dinosaurios sobrevivieron a la extinción masiva de finales del Triásico y mantuvieron su dominio durante el Jurásico. Pero, a lo largo de 30 millones de años de ese período, el linaje de los mamíferos experimentó otra explosión evolutiva. Gran parte del registro de esa nueva fase de diversificación procede de los miles de fósiles recuperados durante la última década en la formación Tiaojishan, en el noreste de China. Los fósiles de estas rocas se hallan en un magnífico estado de conservación e incluyen insectos, dinosaurios emplumados y más de dos docenas de esqueletos de mamíferos, muchos envueltos

De la musaraña al hombre

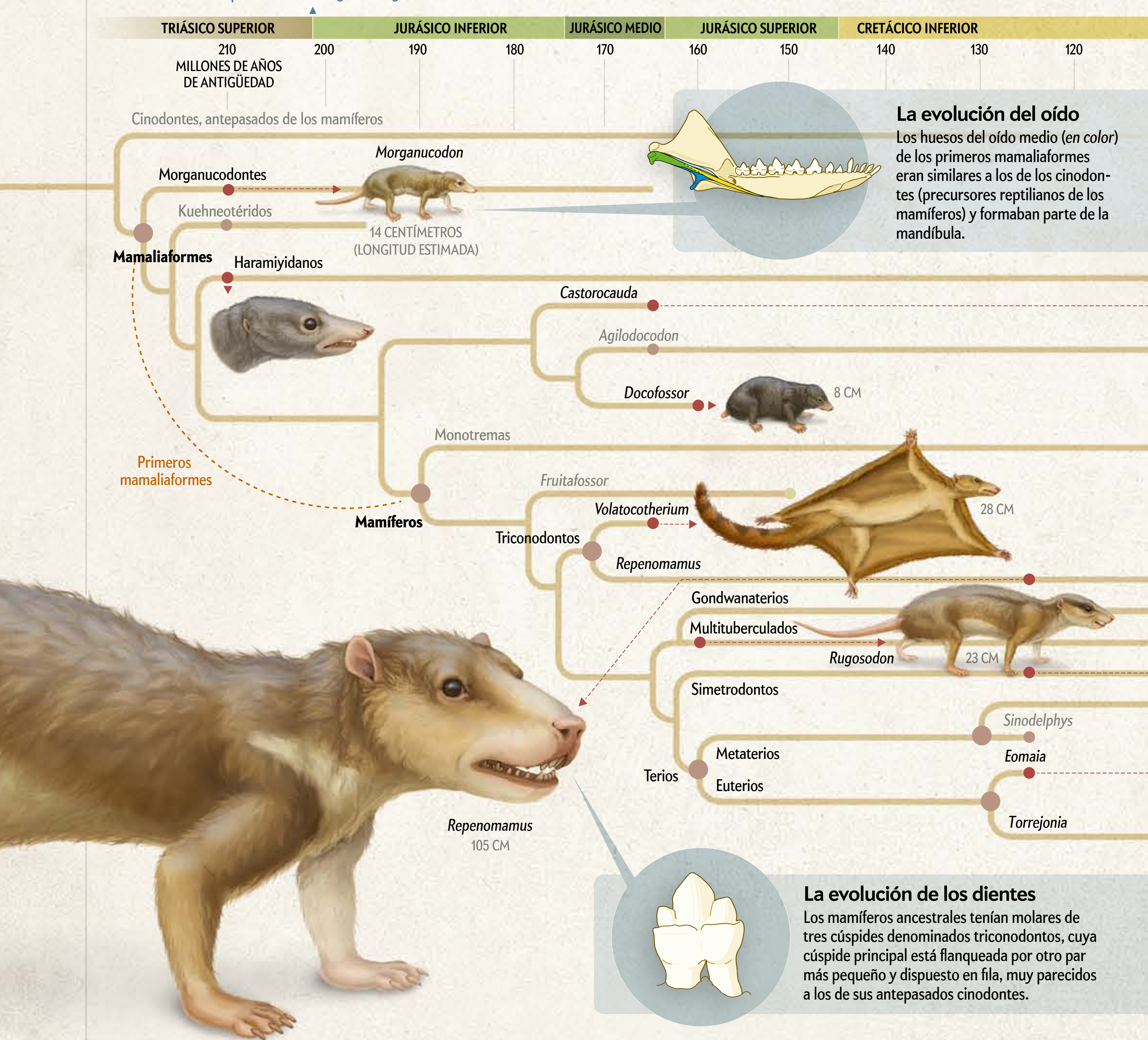
Recientes descubrimientos de fósiles han permitido a los paleontólogos reconstruir la evolución de los mamíferos desde sus humildes antepasados, similares a una musaraña, hasta la extraordinaria variedad actual de la que somos parte. Entre las innovaciones clave que ayudaron a cosechar ese enorme éxito se cuentan cambios en la dentición y en el oído que les permitieron ocupar todo tipo de nichos ecológicos.

Inicios discretos

Los primeros animales de aspecto similar a los mamíferos, los mamaliaformes, aparecieron sobre la Tierra cuando los continentes estaban unidos en una sola masa.

Especialización inicial

Los expertos pensaban que la evolución de los mamíferos permaneció estancada hasta la desaparición de los dinosaurios. Pero nuevas pruebas demuestran su adaptación a una amplia gama de tipos de alimentación y locomoción durante el reinado de los reptiles.

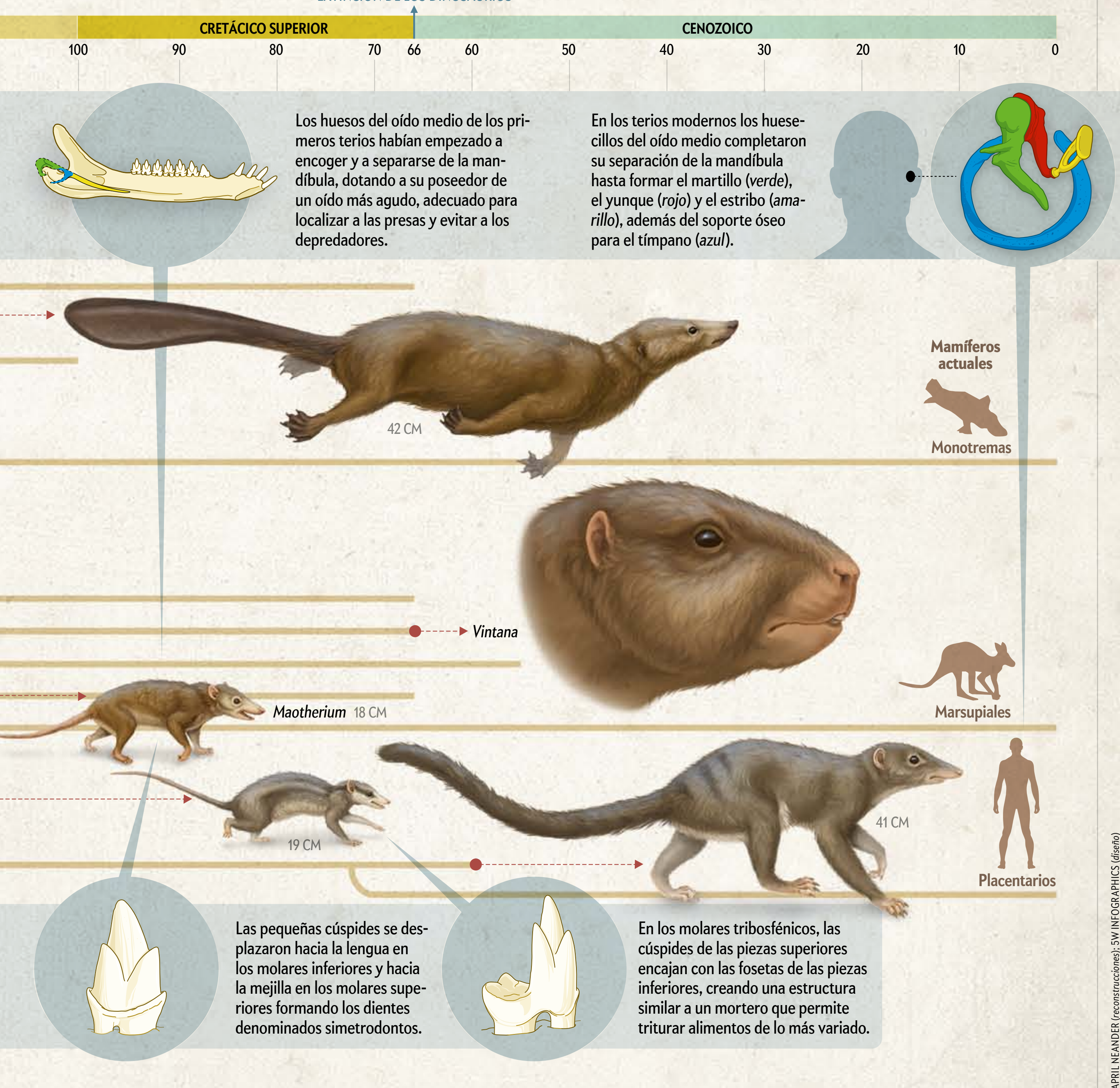


El auge de los mamíferos

La aparición de las plantas con flores favoreció la evolución de los mamíferos terios, el grupo que engloba a los marsupiales y los placentarios, los cuales dan a luz crías desarrolladas.

El fin de lo antiguo

Si bien los mamíferos habían logrado éxitos notables en la época de los dinosaurios, la extinción de estos propició la espectacular diversificación de los placentarios, dispuestos a ocupar los nichos vacantes.



APRIL NEANDER (*reconstrucciones*); 5W INFOGRAPHICS (*diseño*)

por halos de pelo. Hace 160 millones de años, todos vivían en lagos y bosques situados en el radio de alcance de las erupciones volcánicas, que causaron su muerte y su enterramiento sin putrefacción.

Los estudios de Luo y otros investigadores con estos mamíferos fósiles de China, entre ellos los de Jin Meng, del Museo Americano de Historia Natural de Nueva York, revelan una notable variedad de formas corporales que abrió la puerta a la ocupación de multitud de nichos ecológicos. *Castorocauda*, un mamaliaforme que sobrevivió hasta época tardía, era del tamaño de un perrito de las praderas, con manos y pies palmeados y cola aplanada como la de un castor. Es el mamífero más antiguo que se conoce con adaptaciones a la natación. *Docofossor* excavaba galerías gracias a sus manos con garras en forma de pala y sus dedos anchos con la articulación fusionada, a semejanza de los actuales topos dorados africanos. *Agilodocodon* era capaz de trepar ágilmente a los árboles y chupar su savia después de roer la corteza con sus dientes en forma de pala. Quizás el más extraño de todos sea *Volaticotherium*, cuyo aspecto recordaría al de una ardilla voladora cuando planeaba entre las ramas gracias a una membrana que se extendía entre sus miembros anteriores y posteriores. Estos especialistas no solo se han hallado en China. Luo y John Wible, del Museo Carnegie de Historia Natural, en Pittsburgh, han descrito en Colorado el fósil de *Fruitafossor*, un excavador mirmecófago. De alguna forma, en todos estos nuevos fósiles de mamíferos del Jurásico se aprecian casi todas las morfologías propias de los pequeños mamíferos actuales.



EL FÓSIL de este pequeño mamífero arborícola hallado en China, *Agilodocodon scansorius*, de 165 millones de años, demuestra que las adaptaciones a la vida arbórea surgieron antes de lo que se pensaba.

CORTESÍA DE ZHE-XI LUO

Durante el Jurásico medio, hace entre 174 y 164 millones de años, el número de mamíferos se multiplicó por doquier. Roger Close, actualmente en la Universidad de Birmingham, ha realizado un estudio estadístico sobre las características esqueléticas en un linaje para calcular el ritmo de cambio anatómico a largo del tiempo. Su análisis revela que las especies del Jurásico evolucionaron mucho más rápido que sus antepasados mamaliaformes del Triásico, hasta dos veces más. Este ritmo acelerado creó las bases de la división del árbol de los mamíferos actuales: los linajes que conducen a los monotremas (ovíparos) y a los terios modernos (el grupo mayoritario, integrado por marsupiales y placentarios) se separaron como si fuesen dos hermanos que deciden emanciparse por separado para engendrar su descendencia.

En realidad, muchos mamíferos del Jurásico que hemos descrito pertenecen a linajes extintos, situados en un punto intermedio entre los monotremas y los terios. Pero son esenciales para entender el origen de los mamíferos actuales, pues nos revelan la morfología de sus antepasados. Estos linajes convivieron con los ancestros de los mamíferos actuales durante el Jurásico y más tarde en el Cretácico, antes de desaparecer. Y en esa explosión evolutiva adoptaron los mismos hábitos de alimentación y locomoción, en convergencia con los ancestros de los mamíferos actuales. Así, los paleontólogos pueden desentrañar por qué algunos de esos animales tan especializados no sobrevivieron hasta épocas modernas.

UNA NUEVA FUENTE DE ALIMENTO

A inicios del Cretácico, hace unos 145 millones de años, la morfología básica de los mamíferos ya estaba consolidada. El cerebro voluminoso y el rápido crecimiento siguieron siendo rasgos clave de la clase. Pero un nuevo cambio evolutivo en apariencia secundario vino a sumarse: la aparición de los molares tribosfénicos, en los que las cúspides de las piezas dentales superiores encajan con las fosetas de las piezas inferiores y permiten triturar la comida como un mortero. Esta disposición de la dentición abrió un abanico de formas de alimentación a los mamíferos.

Gracias a esa versátil dentición, los mamíferos terios iniciaron un proceso de diversificación. Los linajes que acabarían engendrando a los grandes grupos actuales —los euterios que evolucionaron en los placentarios y los metaterios que se convertirían en los marsupiales— tomaron derroteros distintos. En China se han hallado restos de los miembros más antiguos y primitivos de ambos linajes, donde vivieron hace más de 125 millones de años, escondidos en el sotobosque entre los pies de los dinosaurios con plumas.

Los primeros terios surgieron al inicio del Cretácico, pero su momento álgido llegaría más tarde. Pocos y menudos, raramente superaban la talla de un jerbo. Durante los primeros 30 millones de años del Cretácico, mamíferos más primitivos de los grupos de los triconodontos y simetrodontos ocuparon una posición más preeminente, un estatus heredado del Jurásico. Algunos integrantes de ambos grupos fueron los mayores mamíferos del Mesozoico, como *Repenomamus*, que alcanzaba el metro de largo, pesaba una quincena de kilos y tenía el aspecto de un glotón. Hallado en rocas del Cretácico inferior de China, su estómago fosilizado contenía huesos de dinosaurios pequeños.

Entonces ocurrió algo inesperado, un acontecimiento que cambiaría el curso de la historia de los mamíferos. Surgió un nuevo tipo de plantas, las angiospermas: los arbustos y árboles con flores y frutos que constituyen el grueso de la flora actual y que nos brindan la mayor parte de nuestros alimentos básicos y decoran nuestros jardines. A mitad del Cretácico, las angiospermas colonizaron los ecosistemas de todo el planeta y proporcionaron nuevas fuentes de alimentos a los mamíferos: las frutas y las flores, así como los insectos que se nutrían de ellas. La capacidad de corte y trituración de los molares tribosfénicos dotó a los terios de la herramienta idónea para ingerirlos. Y prosperaron. Mientras tanto, los mamíferos de dentición más primitiva, como el cazador de dinosaurios *Repenomamus*, cayeron en declive y no sobrevivieron al Cretácico.

Con todo, el aumento de las opciones de alimentación no garantizaba el éxito de los terios. Se estaba fraguando una lucha por la subsistencia. Mientras que algunos terios se volvieron insectívoros a mitad o a finales del Cretácico, otros grupos primitivos desarrollaron denticiones más complejas adaptadas al

corte y la trituración de las nuevas angiospermas. Los continentes boreales fueron colonizados por animales similares a las ratas con dentición multituberculada e incisivos prominentes. A pesar de su apariencia, no eran parientes cercanos de los roedores, sino que habían convergido en su anatomía por consumir alimentos similares. Estudios recientes de Gregory Wilson, de la Universidad de Washington, y David M. Grossnickle, de la Universidad de Chicago, basados en la aplicación de complejos métodos estadísticos a una gran base de datos con medidas de fósiles, han demostrado que los multituberculados estaban prosperando en las postrimerías del Cretácico. En paralelo con la propagación de las angiospermas surgieron numerosas especies de multituberculados, algunas de gran talla y armadas de molares muy intrincados.

En los continentes del hemisferio sur también vivieron algunos competidores de los terios. Los paleontólogos saben muy poco acerca de los mamíferos australes del Cretácico superior, pero algunos hallazgos recientes sugieren que un grupo extraño estaba prosperando: los gondwanaterios, que a pesar de su nombre no eran verdaderos terios. Durante décadas, el único rastro sobre estos misteriosos mamíferos consistió en dientes sueltos: unos molares de corona alta que crecían toda la vida y similares a los dientes de los caballos y las vacas, sumamente útiles para triturar vegetales tenaces. En 2014, un equipo dirigido por David Krause, de la Universidad Stony Brook, dio a conocer el primer cráneo de un gondwanaterio perteneciente a la nueva especie *Vintana*, que vivió en Madagascar a finales del Cretácico. Era similar a un castor y posiblemente se alimentaba de las primeras herbáceas que surgieron en ese período.

LA CATÁSTROFE CREA LA OPORTUNIDAD

En las postrimerías del Cretácico, hace unos 66 millones de años, los mamíferos gozaban de una buena situación. Habían prosperado desde sus inicios en el Triásico, y numerosos terios insectívoros, multituberculados y gondwanaterios herbívoros habían hallado su lugar en la cadena trófica que coronaban los grandes dinosaurios, entre ellos *Tyrannosaurus*. No obstante, aún debían conformarse con habitar el sotobosque, sin posibilidad de ocupar nuevos hábitats.

Pero su suerte, como la de tantos otros, cambió de repente cuando un asteroide caído del cielo desencadenó una oleada de incendios forestales, terremotos, maremotos y erupciones que modificó la faz del planeta en cuestión de días o semanas. Los dinosaurios no soportaron el cataclismo y el cambio climático y ambiental desatado por el impacto. Y de esta forma, las majestuosas criaturas que habían reinado durante más de 150 millones de años quedaron condenadas a la extinción.

La mortandad también diezmó a los mamíferos. Hay pruebas de su declive gracias al programa intensivo de excavaciones dirigido inicialmente por William Clemens, de la Universidad de California en Berkeley, y ahora por Wilson. Durante cinco décadas se han recopilado meticulosamente fósiles en rocas de Montana que abarcan el momento de la extinción. Los resultados muestran que la mayoría de los mamíferos más grandes y más especializados en su dieta desaparecieron con los dinosaurios. Los metaterios, surgidos durante el Cretácico superior, se extinguieron casi por completo. De no ser por un puñado de supervivientes, sus descendientes, los canguros y los koalas de Australia, no habrían existido jamás.

Entre los que consiguieron sobrevivir a la crisis también se hallaban algunos de los primeros placentarios, que como nosotros dan a luz crías en un avanzado estado de desarrollo. Los estudios del llamado reloj molecular permiten calcular, a partir de las diferencias de ADN entre las especies actuales, en qué momento se separaron unas de otras. Tales estudios indican que el ancestro común de los placentarios convivió con los dinosaurios cretácicos. Pero solo después de su extinción, a finales de ese período, pudieron diversificarse y dividirse para dar lugar a la mayor parte de los grupos actuales, desde los roedores a los primates. La razón del cambio es clara. Con *Tyrannosaurus*, *Triceratops* y otros dinosaurios fuera de combate, los placentarios tuvieron vía libre y, de nuevo, evolucionaron con rapidez para llenar los nichos ecológicos vacantes.

Que la muerte de los dinosaurios fue fundamental para los mamíferos no es una idea nueva en absoluto. Pero ahora entendemos mejor el papel exacto que desempeñó y, sobre todo, cuál fue la chispa que encendió la revolución de los placentarios. Como todas las revoluciones, todo sucedió muy rápido, en escasos miles de años; un instante en la escala geológica. Uno de nosotros (Brusatte) ha emprendido numerosas expediciones a Nuevo México para conocer mejor ese momento crítico de la evolución, de qué forma los mamíferos pudieron sobrevivir a la catástrofe y cómo su alimentación y sus costumbres los ayudaron en ese mundo apocalíptico. En los terrenos áridos de la Formación Nacimiento existe el mejor registro del mundo para averiguar cómo prosperaron los mamíferos después de la extinción de los dinosaurios. El compañero de Brusatte, Thomas Williamson del Museo de Historia Natural y Ciencia de Nuevo México, ha estado recorriendo estas rocas durante más de 25 años y ha recogido miles de fósiles que, gracias a su memoria fotográfica, puede recordar con todo detalle uno por uno. Los fósiles consisten en mandíbulas y dientes de numerosas especies de mamífero que van desde insectívoros del tamaño de una musaraña hasta depredadores con dientes de sable y herbívoros de la talla de una vaca. Vivieron apenas 500.000 años después del impacto del asteroide, una prueba de la rapidez con la que los placentarios conquistaron el planeta, cuando tuvieron la oportunidad.

Gracias a su éxito estamos aquí para contarlo. Entre los placentarios descubiertos por Williamson en Nuevo México se halla el esqueleto de un animal del tamaño de un cachorro, llamado *Torrejonia*, con extremidades alargadas y dedos muy largos. Vivió hace unos 63 millones de años, pero cuando observamos su esbeltez podemos imaginar cómo saltaba de árbol en árbol y se sujetaba a las ramas con los finos dedos de los pies. Es uno de los primates más antiguos, un lejano primo nuestro. Hubieron de transcurrir 60 millones de años para que la evolución transformase esos pequeños protoprimates en simios bípedos y dotados de filosofía. Pero eso es otro capítulo de la evolución de los mamíferos, un viaje que ahora dura 200 millones de años y que sigue su curso.

PARA SABER MÁS

The origin and early evolution of Metatherian mammals: The Cretaceous record. Thomas E. Williamson, Stephen L. Brusatte y Gregory P. Wilson en *ZooKeys*, art. 465. Publicado online, 17 de diciembre de 2014.

An arboreal Docodont from the Jurassic and mammaliaform ecological diversification. Qing-Jin Meng et al. en *Science*, vol. 347, págs. 764-768, 13 de febrero de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los primeros mamíferos placentarios. Maureen A. O'Leary en *IyC*, enero de 2015.

¿Qué causó la extinción de los dinosaurios? Stephen Brusatte en *IyC*, febrero de 2016.

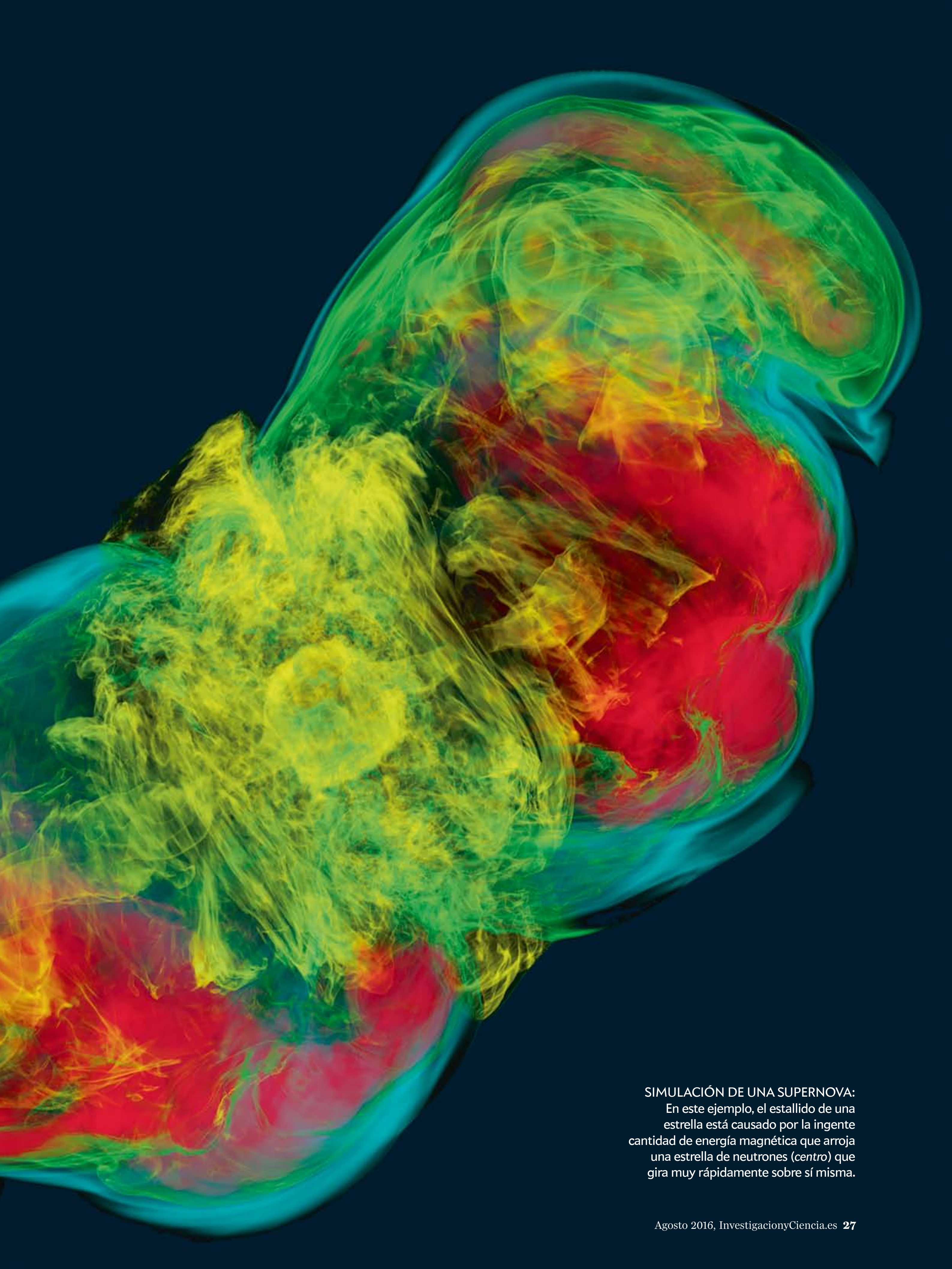
ASTROFÍSICA

SUPERNOVAS EXTRAÑAS

Cada año, miles de estrellas explotan en una desconcertante variedad de formas. Los astrónomos quieren saber qué las hace estallar

Daniel Kasen

CADA SEGUNDO, UNA CATÁSTROFE ESTELAR DESTRUYE UN SOL en algún lugar del universo observable. Sucede cuando una estrella pulsa, choca, se convierte en un agujero negro o explota en forma de supernova. Este aspecto dinámico del universo, oculto tras la aparente calma del cielo nocturno, ha pasado hace poco a ocupar un lugar prominente en la investigación astronómica. Durante casi un siglo, hemos intentado averiguar lo ocurrido durante miles de millones de años de evolución cósmica. Sin embargo, solo en fecha reciente hemos empezado a analizar los acontecimientos celestes en una escala temporal de días y horas. Gracias a ello, estamos asistiendo a la inestable vida y explosiva muerte de numerosas estrellas.



SIMULACIÓN DE UNA SUPERNOVA: En este ejemplo, el estallido de una estrella está causado por la ingente cantidad de energía magnética que arroja una estrella de neutrones (*centro*) que gira muy rápidamente sobre sí misma.

Daniel Kasen es un astrofísico de la Universidad de California en Berkeley y del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley. Su investigación se centra en desarrollar modelos teóricos e informáticos para explicar los múltiples tipos de explosiones estelares del universo.



Aunque hasta ahora nos faltaban las herramientas para estudiar en detalle estos fenómenos, las pruebas de la transitoriedad del universo existen desde hace tiempo: al menos, desde el año 1006, fecha en que astrónomos chinos observaron una «estrella invitada» que se hizo perceptible a simple vista durante unas semanas para luego desaparecer. Tycho Brahe registró un evento similar en 1572, al igual que hiciera Johannes Kepler unos treinta años más tarde. Hoy sabemos que aquellas apariciones fueron explosiones de supernova. En su pico de intensidad, estos estallidos estelares pueden brillar más que mil millones de soles. Pero, dado que la mayoría se encuentran a enormes distancias, las vemos como tenues puntos de luz que pueden pasar fácilmente inadvertidos en la inmensidad del cielo.

La tecnología moderna está revolucionando el estudio del universo dinámico. Hoy los telescopios son robóticos y están equipados con cámaras digitales de alta resolución que envían sus datos a programas de procesamiento de imágenes y reconocimiento de patrones. Los aparatos observan regularmente grandes franjas del cielo, con su mirada digital atenta a lo que acecha en la noche. A lo largo de los últimos diez años, estos nuevos medios nos han permitido descubrir miles de explosiones estelares al año: cada semana encontramos tantas nuevas supernovas como todas las que se vieron en el siglo XX.

Pero no solo estamos coleccionando más supernovas; también estamos descubriendo nuevas clases de explosiones estelares. Algunas son sumamente brillantes, 100 veces más que las supernovas corrientes, pero otras son 100 veces más tenues. Las hay que exhiben un intenso color rojo y las hay que brillan en el ultravioleta. Algunas resplandecen durante años y otras se apagan en pocos días. Las muertes estelares están resultando muchísimo más diversas de lo que pensábamos.

Los astrónomos todavía están tratando de entender qué provoca estas singulares explosiones. Parece evidente que nos están diciendo algo importante sobre la vida y la muerte de las estrellas, así como sobre las leyes físicas en condiciones extremas de temperatura, densidad y gravedad. Mediante el estudio de este variopinto «zoo» de supernovas, esperamos descubrir por qué las estrellas se desmoronan hasta convertirse en remanentes estelares muertos, como agujeros negros.

Las supernovas también pueden enseñarnos algo sobre nuestro propio origen. Justo después de la gran explosión con la que comenzó el universo, los únicos núcleos atómicos existentes en el cosmos eran los más ligeros; en su mayoría, hidrógeno y helio. El resto de los elementos químicos (como el calcio de nuestros huesos o el hierro de nuestra sangre) fueron sintetizados millones de años más tarde en los procesos de fusión nuclear que tienen lugar en el corazón de las estrellas y, luego, dispersados por explosiones estelares. Hasta ahora se pensaba que las supernovas corrientes crearon los elementos más pesados de la tabla periódica, pero el descubrimiento de tantos estallidos anómalos parece indicar que las diferentes casillas de la tabla podrían haber tenido orígenes distintos. Mediante la observación de un gran número de supernovas diferentes, estamos cada vez más cerca de entender cómo un variado surtido de explosiones estelares pudo haber contribuido a la mezcla de elementos que componen nuestro planeta y los seres vivos.

CATÁSTROFE ESTELAR

Para entender cuán extrañas son algunas de las supernovas que estamos descubriendo, consideremos primero una supernova típica, que en sí misma es ya un fenómeno extraordinario. Una estrella es una especie de reactor nuclear estable: una enorme bola de plasma que se mantiene unida por la gravedad y que es sustentada por la fusión nuclear que tiene lugar en su núcleo. El calor liberado en la fusión genera una presión hacia fuera que contrarresta la gravedad. Una supernova estalla cuando, en ese equilibrio de fuerzas, aparece alguna inestabilidad: la arrolladora victoria de la gravedad sobre la combustión nuclear, o viceversa.

El tipo más común de supernova se produce en estrellas de tamaño moderado, unas diez veces más masivas que el Sol o algo mayores. Estos astros viven durante millones de años, durante los cuales fusionan continuamente hidrógeno para formar elementos cada vez más pesados. Una vez que han convertido su interior en hierro —un elemento que básicamente es «ceniza nuclear»—, la fusión no puede continuar. Sin esta presión hacia fuera, el núcleo más interno de la estrella colapsa por su propio peso y comprime su volumen un millón de veces. Se transforma así en una estrella de neutrones: una perla ultradensa que reúne una masa superior a la del Sol en una región de pocos kilómetros de diámetro. La enorme energía liberada en esta caída libre hace estallar al resto de la estrella.

Para tener una idea de la energía implicada en una supernova típica, imaginemos que el Sol hubiese quemado en unos

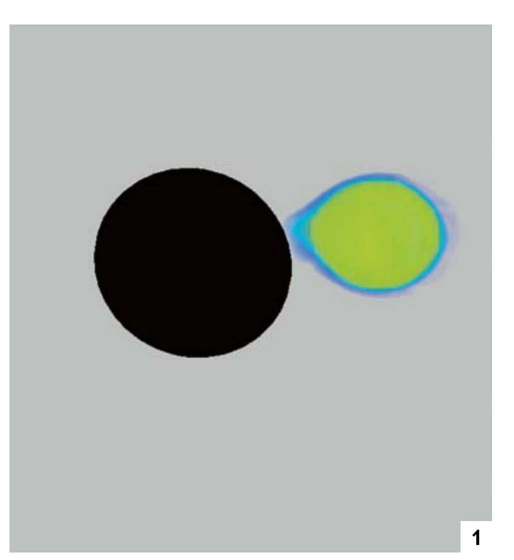
EN SÍNTESIS

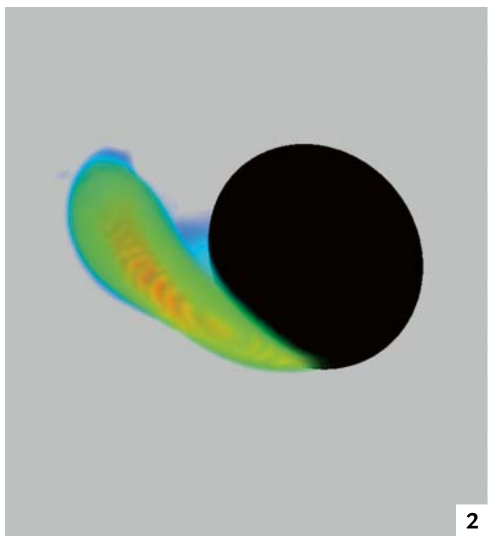
La llegada de telescopios automatizados que barren rápidamente el cielo ha revelado la existencia de una gran cantidad de supernovas poco comunes. Entre ellas hay algunas cien veces más brillantes de lo normal, pero también otras mucho más tenues y que apenas llegan a estallar.

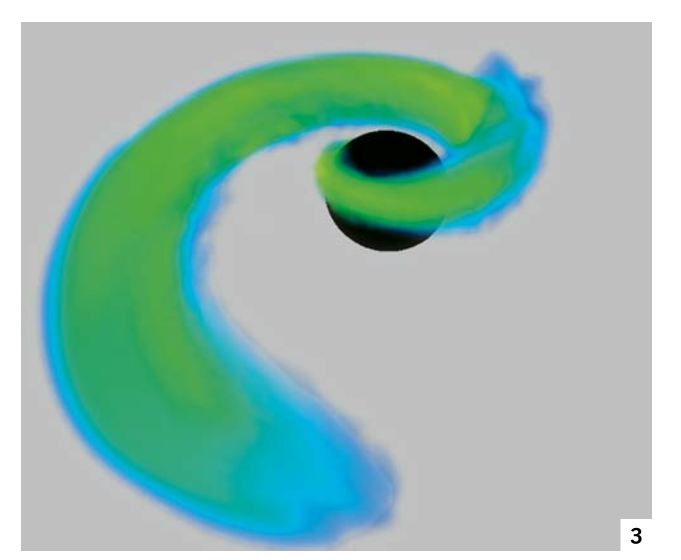
Los expertos han elaborado varias teorías sobre qué tipo de estrellas podrían dar lugar a estos sucesos anómalos y sobre su papel en la síntesis de los elementos químicos pesados presentes en el planeta y nuestro organismo.

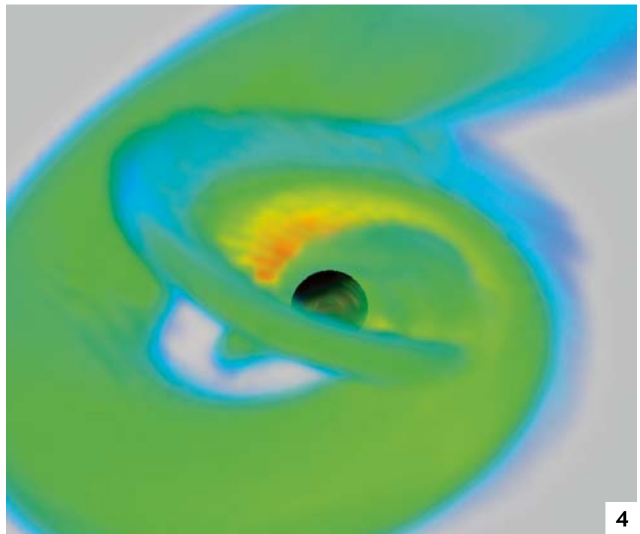
Las observaciones futuras deberían ayudar a responder varias preguntas fundamentales sobre cómo viven y mueren las estrellas y sobre cómo afecta todo ello a la vida en la Tierra.

COLISIÓN ESTELAR: Esta simulación recrea la fusión de una estrella de neutrones (*verde*) y un agujero negro. El proceso es similar al que se cree que tiene lugar cuando se unen dos estrellas de neutrones, fenómeno que podría explicar algunas supernovas menos luminosas de lo normal. Aquí la gravedad del agujero negro deforma la estrella de neutrones (*1* y *2*). Parte de la materia es expulsada en forma de cola (*3*) y el resto envuelve al agujero negro (*4*). En última instancia, el agujero negro engulle casi toda la estrella de neutrones.









CORTESÍA DE FRANCOIS FOUCART, LABORATORIO NACIONAL LAWRENCE EN BERKELEY Y UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA EN BERKELEY

segundos todas sus reservas originales de hidrógeno, suficientes para que brille durante más de 10.000 millones de años. Esa enorme cantidad de energía viene cuantificada por su propia unidad física: un foe, o bethe (en honor del premio nóbel Hans Bethe). Cuando explota una supernova, la temperatura interior de la estrella se eleva por encima de los 2500 millones de grados Celsius. Se produce entonces una onda expansiva supersónica que deja a su paso un revoltijo de elementos pesados recién sintetizados, como silicio, calcio y hierro, e isótopos radiactivos de níquel, cobalto y titanio. En cuestión de minutos, la estrella estalla y se convierte en una nube de ceniza y residuos radiactivos expulsados a 30 millones de kilómetros por hora, un pequeño porcentaje de la velocidad de la luz.

Por fortuna, el Sol es demasiado pequeño y nunca dará lugar a una supernova. Pero, si lo hiciera, la primera señal en la Tierra sería un breve destello de intensos rayos X que acabarían con toda la vida del planeta. En unos pocos minutos, la nube de restos solares doblaría su tamaño y se haría unas 1000 veces más brillante que el Sol. Al cabo de unas horas, la nube engulliría la Tierra y, un día después, se tragaría a Júpiter y Saturno. Tras unas pocas semanas, las cenizas solares se extenderían por todo el sistema solar. En ese momento la nube de escombros se volvería translúcida, y la luz que estaba confinada en su interior saldría a raudales, alcanzando una luminosidad máxima equivalente a la de mil millones de soles.

Los astrónomos casi nunca captamos la breve ráfaga de rayos X de una supernova, y solo en raras ocasiones podemos desenterrar una imagen de archivo de la estrella tal y como era antes de estallar. Solemos ver las secuelas: la enorme nube de restos radiactivos en expansión, que brilla durante unas semanas o, en ocasiones, más tiempo. Mediante el examen de las cenizas, tratamos de reconstruir la historia para averiguar qué tipo de estrella fue destruida y por qué.

EXTRAÑAMENTE BRILLANTES

Entre la colección de supernovas raras descubiertas recientemente, tal vez las más impresionantes sean unas explosiones hiperenergéticas, más de 100 veces más luminosas que las corrientes, a las que denominaré «ultranovas». Estos estallidos constituyen las supernovas más brillantes y distantes jamás descubiertas, y pueden verse aun después de que su luz haya atravesado casi todo el universo observable. Este tipo de explosiones son muy poco frecuentes: quizás haya una por cada mil supernovas corrientes. Aunque nadie sabe a ciencia cierta por qué brillan tanto, hay tres teorías principales. Una de ellas podría explicar la mayor parte o la totalidad de las ultranovas que

observamos, si bien parece más probable que las tres situaciones tengan lugar con cierta frecuencia.

SUPERNOVAS DE PARES DE PARTÍCULAS. Como es natural, muchos tratan de asociar las ultranovas con estrellas de una masa extremadamente grande. La teoría parece indicar que tales estrellas son en realidad objetos bastante delicados y propensos a padecer diversas inestabilidades. En particular, las estrellas con masas comprendidas entre las 150 y las 250 masas solares pueden alcanzar en su centro temperaturas tan elevadas que bastan para generar un aluvión de pares de partículas de materia y antimateria (concretamente, electrones y positrones). Producir estas partículas requiere energía, lo que reduce la presión de la estrella hacia el exterior y hace que su núcleo, todavía lleno de combustible nuclear, se derrumbe. De ocurrir algo así, el resultado sería desastroso. La compresión del núcleo aceleraría la fusión nuclear hasta dejarla fuera de control y consumir casi todo el material. La repentina liberación de energía, que podría llegar a alcanzar los 100 bethes, invertiría el colapso y haría que la estrella estallase por completo. No quedaría nada.

Estas explosiones nucleares, las más gigantescas de todas, producirían nubes de residuos 1000 veces más radiactivas que las de las supernovas corrientes. Se cree que sus nubes son extraordinariamente masivas y opacas, por lo que la luz tardaría un año o más en difundirse. Por tanto, esperamos que el período que sigue a estas explosiones quede caracterizado por un intenso brillo de muy larga duración. Algunas de las ultranovas descubiertas hace poco revisten justo esas propiedades, lo que ha llevado a algunos astrónomos a afirmar que hemos sido testigos del asesinato de una estrella gigante por parte de una plaga de pares de partículas microscópicas. Otros, sin embargo, defienden que hay teorías alternativas que explican mejor los datos. Esperamos que las futuras observaciones de estos eventos brillantes y duraderos revelen mejor la composición y la velocidad de la nube de restos estelares y nos digan si esta clase de situación se da realmente.

SUPERNOVAS DE FALSA ALARMA. Una idea alternativa para explicar las ultranovas propone que estas explosiones se originarían en estrellas con una masa algo menor, entre las 70 y las 150 masas solares. Se cree que estas estrellas están sujetas a inestabilidades similares a las de sus hermanas de mayor masa, pero con consecuencias no tan graves. Tras empezar a desmoronarse y tras acelerarse su combustión, podrían reponerse, volver a expandirse y frenar las reacciones nucleares antes de que queden fuera de control. Gracias a ello, seguirían viviendo el día después. Al recobrar su estabilidad, sin embargo, es probable que se desprendan de una buena parte de sus capas exteriores. Se produciría así una «supernova impostora»: un estallido que parece una supernova tenue, pero que, en realidad, no es más que una experiencia cercana a la muerte.

Las estrellas que se encuentran en este intervalo de masas pueden atravesar por varios de estos trances, perdiendo un poco más de materia cada vez hasta que finalmente agotan su combustible nuclear y explotan como supernovas corrientes. Cuando una de ellas muere, expulsa sus restos a un medio contaminado con capas de material expulsado en estallidos anteriores. El violento choque de la nube de restos de la supernova con estas capas generaría un intenso brillo, lo que podría explicar algunas de las ultranovas.

Varios sondeos automatizados han registrado hace poco los frenéticos últimos años de vida de una estrella masiva. En 2009, los astrónomos detectaron lo que parecía ser una supernova bastante común, aunque ligeramente tenue. Bautizada como SN2009ip, se apagó en unas pocas semanas y fue olvidada casi por completo. Un año después, y para sorpresa de todos, se observó otra «supernova» tenue justo en el mismo lugar. Al parecer, la estrella aún no estaba muerta. En 2012 se vio un tercer estallido y, un mes más tarde, otro muy luminoso.

Algunos científicos creen que el penúltimo brote supuso la verdadera muerte de la estrella, mientras que el último, más luminoso, se debió al impacto de la nube de restos de la supernova contra el material expulsado en los estertores previos. Otros piensan que la estrella todavía está viva y continuará entreteniéndonos con más estallidos. Pasarán algunos años hasta que se aclare este asunto, pero por el momento hemos visto el tipo de inestabilidad violenta que creemos que constituye el final de la vida de algunas estrellas de gran masa.

SUPERNOVAS MAGNÉTICAS. Por último, una hipótesis alternativa argumenta que el brillo excesivo de las ultranovas no tiene tanto que ver con una masa extrema como con una rotación muy rápida. Las estrellas con una masa inicial de 10 masas solares muy probablemente producen supernovas corrientes en las que se forma una estrella de neutrones. Si una estrella de esa masa rota muy deprisa antes del colapso, este podría hacer que la estrella de neutrones resultante girara a enormes velocidades, como cuando un patinador artístico repliega sus brazos para acelerar. En principio, una estrella de neutrones puede dar hasta 1000 vueltas por segundo (si girase mucho más deprisa, las fuerzas centrífugas la destrozarían). La energía cinética almacenada en una peonza tan masiva es enorme: hasta 10 bethes.

¿Cómo puede aprovecharse esta energía de rotación para alimentar una ultranova? Las estrellas de neutrones generan enormes campos magnéticos, los cuales pueden transportar la energía. Para entender cómo, imaginemos que hacemos girar un imán de nevera en la palma de la mano. Eso retuerce el campo magnético que lo rodea: aunque no podamos verlo ni sentirlo, una parte de la energía que hemos invertido es transportada al espacio en forma de perturbaciones magnéticas. Creemos que el mismo proceso ocurre, a una escala mucho mayor, alrededor de las estrellas de neutrones. Un ejemplo visualmente fascinante lo hallamos en la nebulosa del Cangrejo, los restos de una supernova observada por astrónomos chinos en el año 1054. Hoy, la luz que nos llega de la nebulosa se debe a la rotación de una estrella de neutrones, la cual genera un remolino de plasma magnetizado. A lo largo de mil años, ese campo magnético retorcido ha ido extrayendo energía rotacional de la estrella y ha calentado el gas circundante, propiciando así el hermoso espectáculo.

Hace unos cinco años, junto con mi colaborador Lars Bildsten, de la Universidad de California en Santa Bárbara, sugerimos que una versión potenciada del dicho proceso podría explicar la gran luminosidad de las ultranovas. La estrella de neutrones tendría que albergar campos magnéticos entre 100 y 1000 veces más intensos que los de la nebulosa del Cangrejo y girar a una velocidad cercana al límite a partir del cual el astro se rompería. Una estrella así podría liberar casi toda su energía de rotación en un mes. De esa forma, la nube de restos de la supernova brillaría con una intensidad un millón de veces mayor que la de la nebulosa del Cangrejo. A pesar de que tales cifras parecen extremas, ya hemos observado algunas estrellas de neutrones con campos magnéticos equiparables (aunque todavía ninguna en la fase de supernova): se denominan magnetares, y albergan los campos magnéticos más intensos que se conocen en el universo. Por tanto, puede que, en ocasiones, las ultranovas señalen el nacimiento y el rápido frenado de la rotación de un magnetar que gira a gran velocidad.

Proliferación de supernovas

Las supernovas, explosiones que señalan la muerte de una estrella, han resultado ser mucho más diversas de lo que se pensaba. Algunas observaciones recientes han puesto de manifiesto la existencia de supernovas 100 veces más brillantes de lo habitual, así como la de otras 100 veces más tenues. Se han propuesto varias teorías para explicar qué clase de estrellas y situaciones dan lugar a algunos de estos exóticos estallidos estelares.

Corriente
En una supernova típica, el núcleo de una estrella al menos 10 veces más masiva que el Sol colapsa y da lugar a una estrella de neutrones, un objeto compacto. Las capas externas estallan y generan una onda expansiva supersónica.

Estrella original: 10 o más masas solares

Estrella de neutrones

Colisión entre estrellas de neutrones
Se piensa que el choque de dos estrellas de neutrones debería formar un agujero negro. Sin embargo, una pequeña parte de la masa podría escapar y sustentar una «kilonova», menos brillante de lo normal.

Estrella de neutrones

Estrella de neutrones

Agujero negro

Magnetar
El colapso de una estrella que gira rápidamente puede producir un magnetar: una estrella de neutrones muy magnetizada. Según una hipótesis, su energía de rotación podría dar lugar a una supernova ultraluminosa.

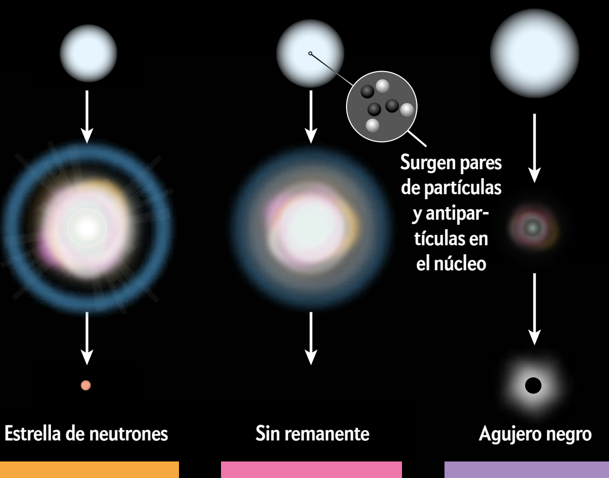
Estrella original: 10 o más masas solares

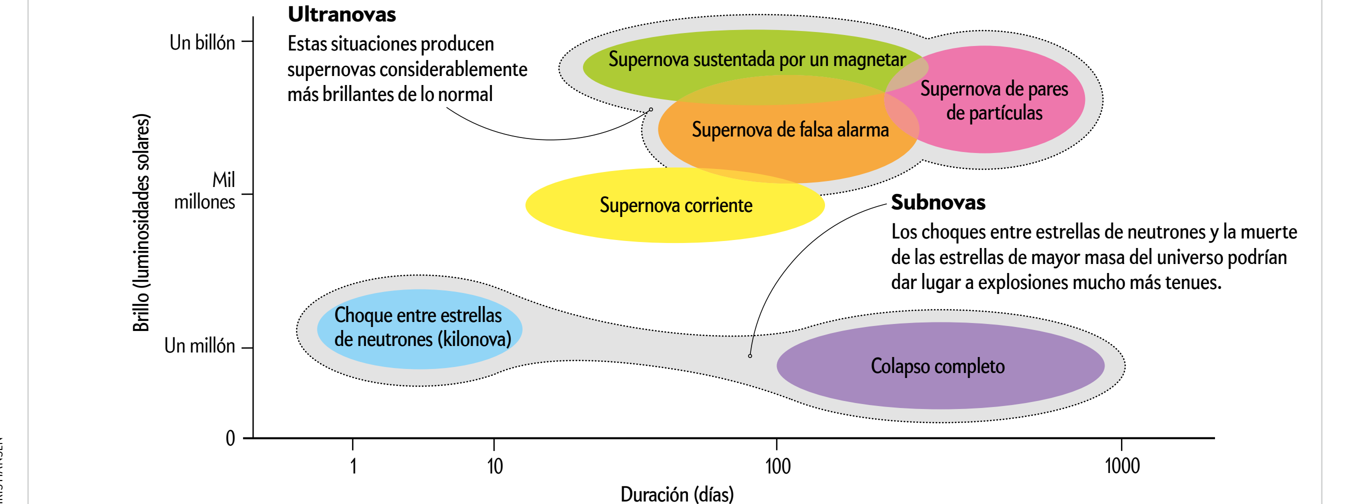
Magnetar

Falsa alarma
Una estrella puede empezar a explotar como supernova, recuperar su estabilidad y expulsar solo algunas de sus capas. Cuando finalmente estallase, los restos impactarían con la capas arrojadas y generarían un destello ultrabrillante.

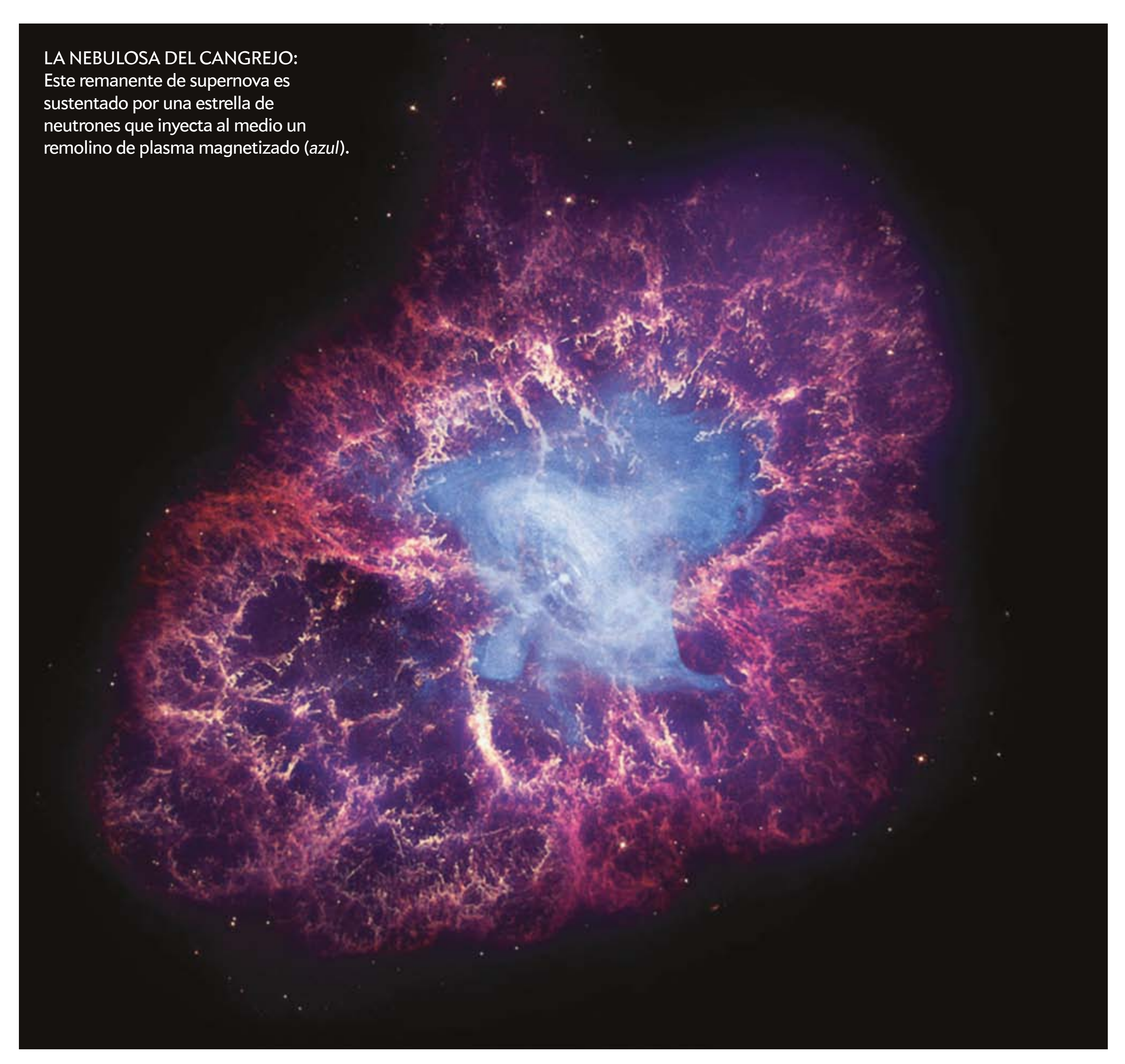
Pares de partículas
Las altas temperaturas del núcleo de una estrella muy masiva pueden generar pares de partículas de materia y antimateria. Estas precipitarían un estallido prematuro cuya energía destruiría la estrella e impediría que se formase un agujero negro.

Colapso completo
Las estrellas de mayor masa pueden producir una especie de «explosión frustrada». Su enorme gravedad comprimiría casi toda la masa del astro en un objeto mucho más denso que una estrella de neutrones: un agujero negro.





JEN CHRISTIANSEN



LA NEBULOSA DEL CANGREJO: Este remanente de supernova es sustentado por una estrella de neutrones que inyecta al medio un remolino de plasma magnetizado (*azul*).

CORTESÍA DE NASA/CXC/SAO/F. SEWARD (*composición*); CORTESÍA DE NASA/ESA/ASU/J. HESTER Y A. LOLL (*óptico*); NASA/JPL-CALTECH/UNIVERSIDAD DE MINNESOTA /R. GEHRZ (*infrarrojo*)

INESPERADAMENTE TENUES

En el extremo opuesto a las ultranovas se han descubierto, también hace poco, extrañas supernovas que brillan menos de lo ordinario. Los sondeos de campo amplio han encontrado varias supernovas unas 100 veces más tenues que las corrientes. Aún se debate la causa de estos débiles estallidos, pero se sospecha que algunos son, sorprendentemente, los últimos resoplidos de las mayores estrellas que hayan existido jamás.

SUPERNOVAS FALLIDAS. No está claro cuál es la mayor masa posible para una estrella, pero es concebible que algunas puedan llegar a entre 300 y 1000 masas solares (más aún que los descomunales astros que, según creemos, podrían explotar a causa de la creación de pares de partículas). En un principio cabría pensar que estos colosos deberían producir las supernovas más espectaculares de todas. Sin embargo, es probable que ni siquiera lleguen a estallar. El campo gravitatorio de una estrella semejante es tan intenso que, una vez se torna inestable, el colapso total es ineludible. El proceso debería acabar abriendo un hueco en el espaciotiempo mismo y dar lugar a un objeto más denso que una estrella de neutrones: un agujero negro.

Los modelos teóricos indican que el agujero negro engulliría la mayor parte de la estrella, por lo que esta desaparecería de repente de la vista. Este suceso hipotético ha sido bautizado como «no-nova». Los rastreos automatizados tratan de encontrar no-novas con un método opuesto al habitual: no buscan una luz repentina en el cielo, sino una estrella brillante que se apaga de repente.

Aunque no estallasen, algunas de las estrellas que se convierten en agujeros negros sí emitirían, al menos, un resplandor. Los núcleos de ciertas estrellas gigantes se encuentran rodeados por un extenso halo de hidrógeno difuso. A medida que la mayor parte del material de la estrella desaparece tras el horizonte de sucesos, el halo de gas puede calentarse y salir disparado, lo que producirá un leve fulgor. Por tanto, la muerte de una estrella muy masiva produciría, irónicamente, una supernova especialmente débil y tenue.

CHOQUES ENTRE ESTRELLAS DE NEUTRONES. Otro tipo de erupciones menos luminosas de lo normal podría deberse a una clase muy diferente de suceso extremo: la colisión entre dos estrellas de neutrones. A menudo, las estrellas de gran masa nacen de dos en dos, lo que da lugar a una pareja que orbita en torno a un centro común. Tales estrellas estallarán en forma de supernova una después de la otra y, si el par no se separa tras las explosiones, formará un sistema binario de estrellas de neutrones (o una estrella de neutrones y un agujero negro, o dos agujeros negros). Con el tiempo, ambos objetos compactos deberían ir acercándose cada vez más, hasta chocar y fusionarse en un agujero negro mayor. Este proceso ha sido confirmado hace poco por el experimento estadounidense LIGO, que ha finales del año pasado detectó por primera vez las ondas gravitacionales generadas en la fusión de dos agujeros negros. Según los cálculos, en la fusión de dos estrellas de neutrones, las enormes fuerzas gravitatorias (unos 10.000 millones de veces más intensas que la atracción gravitatoria que la Tierra ejerce sobre nuestro cuerpo) bastarían para arrancar alrededor del 1 por ciento de la «piel» de las estrellas y arrojarlo al espacio (el 99 por ciento restante caería al agujero negro).

Lo más probable es que esa pequeña cantidad de material que se libra de caer en el agujero negro sea peculiar: un mar vaporizado de partículas disociadas, en su mayoría neutrones, junto con algunos protones y electrones. A medida que se descomprime el gas, las partículas deberían comenzar a unirse en núcleos más pesados. Los protones se repelerían entre sí debido a su carga eléctrica, pero los neutrones, carentes de carga, se unirían más fácilmente a otras partículas. Los núcleos atómicos irían ganando neutrones progresivamente y haciéndose más y más pesados, lo que produciría una lluvia de elementos de la mitad inferior de la tabla periódica, como oro, platino y mercurio, mezclados en una acumulación de residuos radiactivos variados que incluiría uranio y torio. Se piensa que los choques entre estrellas de neutrones son uno de los pocos lugares del universo donde pueden formarse estos elementos pesados.

La abundancia de material radiactivo debería hacer que la nube de restos brillase como una supernova. Pero, debido a que la masa implicada en el proceso es hasta cierto punto pequeña (menos del 1 por ciento de la presente en una supernova), esperamos que su luz sea unas 100 veces más tenue que la de una supernova corriente y que apenas dure unos días. Un estudio teórico reciente realizado junto con Jennifer Barnes, mi estudiante de doctorado en la Universidad de California en Berkeley, nos hace pensar que la peculiar mezcla de elementos pesados que habría en estas nubes debería conferir al resplandor un color distintivo: bien un intenso tono rojizo, o bien uno infrarrojo. Este fenómeno ha recibido el nombre de «kilonova».

Puede que hace poco se haya visto por primera vez este «humo» rojo radiactivo procedente del choque entre estrellas de neutrones. En junio de 2013, una breve ráfaga de rayos gamma alertó sobre una posible fusión de estrellas de neutrones. Tras apuntar hacia allí el telescopio espacial Hubble, los astrónomos captaron un breve resplandor infrarrojo que desapareció al cabo de unas semanas. Si bien escasos, los datos resultan compatibles con las predicciones teóricas relativas a una kilonova. Si la identificación es correcta, habríamos sido testigos directos por primera vez de la síntesis de metales pesados preciosos. Nos gustaría observar más sucesos de este tipo para determinar mejor la cantidad de metales producidos en ellos y averiguar si explican todas las abundancias de oro, platino y demás elementos pesados en el universo, o solo una parte.

UN COSMOS CAÓTICO

Nuestro estudio del universo dinámico no ha hecho más que comenzar. En el plazo de unos diez años, los nuevos telescopios automatizados —como la Instalación para Fenómenos Transitorios Zwicky, que entrará en funcionamiento en el Observatorio Palomar, en California; el Gran Telescopio para Sondeos Sinópticos (LSST), en construcción en Chile; y el Telescopio de Rastreos Infrarrojos de Campo Amplio (WFIRST), de la NASA— podrán escudriñar la mayor parte del cielo cada pocas noches, lo que permitirá descubrir cientos de veces más supernovas que hoy. Mientras tanto, los superordenadores modernos empiezan a llevar a cabo simulaciones tridimensionales detalladas de estos sucesos, gracias a las cuales podemos visualizar lo que debería ocurrir en el interior de las estrellas que explotan.

La muerte de una estrella excepcionalmente masiva podría generar una supernova muy tenue

Los datos que se tomen en los próximos años pondrán a prueba nuestras teorías sobre los diferentes tipos de muertes estelares. Todas las posibilidades descritas aquí son físicamente verosímiles, pero su existencia aún no ha sido demostrada. Con más observaciones, esperamos identificar cuáles de estas posibilidades explosivas se dan en la naturaleza. Lo más probable es que el universo nos sorprenda con fenómenos aún más exóticos que los que hemos concebido hasta ahora.

En última instancia, también podremos relatar una historia más detallada de los materiales que constituyen nuestro organismo y el mundo que nos rodea. Su anillo de oro, por ejemplo, tiene una historia que se remonta mucho más allá de la de sus antepasados. Es probable que, en un principio, ese material flotara en el horno de hierro de una estrella masiva que desfalleció, colapsó y se comprimió hasta formar una estrella de neutrones. Mucho más tarde, quizá mil millones de años después, esa estrella de neutrones tal vez chocase con otra y arrojase al espacio una nube de residuos radiactivos. A más de 100 millones de kilómetros por hora, esa nube habría surcado más de 1000 años luz a través de la galaxia, mezclándose por el camino con otros gases hasta depositarse sobre la corteza de la Tierra. Con el tiempo, alguien desenterró esos escombros estelares, les dio forma de anillo y comenzó a contar sus propias historias. IyC

PARA SABER MÁS

Supernova light curves powered by young magnetars. Daniel Kasen y Lars Bildsten en *Astrophysical Journal*, vol. 717, n.° 1, págs. 245-249, julio de 2010.

The unprecedented 2012 outburst of SN 2009ip: A luminous blue variable star becomes a true supernova. Jon C. Mauerhan et al. en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 430, n.° 3, págs. 1801-1810, abril de 2013.

Effect of a high opacity on the light curves of radioactively powered transients from compact object mergers. Jennifer Barnes y Daniel Kasen en *Astrophysical Journal*, vol. 775, n.° 1, art. 18, septiembre de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Super supernovas. Avishay Gal-Yam en *IyC*, agosto de 2012.



CAMBIO CLIMÁTICO

LAS GUERRAS DEL CALENTAMIENTO GLOBAL

El Ejército estadounidense ya ha comenzado a tomar medidas para evitar que las sequías y la fusión del Ártico no deriven en conflictos que comprometan la seguridad nacional

Andrew Holland

EN SÍNTESIS

El cambio climático está acelerando la inestabilidad en algunas regiones y multiplicando las amenazas en otras. El Ejército estadounidense está tomando medidas para prevenir las consecuencias que pondrían en riesgo los intereses de EE.UU.

En África, intenta paliar los conflictos desatados por la gran sequía y la pérdida de tierras agrícolas. En la región asiática del Pacífico, ayuda a las naciones pequeñas a recuperarse de los graves temporales para que puedan mantenerse firmes ante la actitud provocadora de China. En el Ártico está promoviendo leyes internacionales que limiten la reclamación por parte de Rusia de los recursos y de las rutas marítimas.

Aún no se sabe si el Ejército invertirá suficiente dinero para apoyar tales medidas. Y un presidente republicano que ponga en duda el cambio climático podría poner fin al respaldo.

THE VOORHES

Andrew Holland es director de estudios e investigador de cuestiones energéticas y climáticas en el Proyecto de Seguridad Estadounidense, un laboratorio de ideas apartidista sobre seguridad nacional. Desde 2007 analiza las amenazas de seguridad relacionadas con el cambio climático y ha declarado ante el Congreso estadounidense sobre el futuro del país en el Ártico.



DEMÓCRATAS Y REPUBLICANOS NO SUELEN IR DE LA MANO EN MATERIA DE CAMBIO climático, por lo que el Ejército estadounidense ha decidido no aguardar a que zanjen sus diferencias para adoptar medidas ante un planeta más cálido que ya ha comenzado a alterar las relaciones geopolíticas y podría derivar en conflictos armados.

El Departamento de Defensa de EE.UU. distingue dos tipos de amenaza: una directa, que pone en peligro sus infraestructuras (basta pensar en las bases navales expuestas al ascenso del nivel del mar) y otra indirecta, que se cierne sobre todo el mundo en caso de desestabilización social. Afrontar el primer peligro es fácil: se trata de identificar las vulnerabilidades y reforzar las infraestructuras o retirarlas de la zona de riesgo.

La segunda amenaza, en cambio, no es tan sencilla. La suma complejidad de la meteorología y de los Gobiernos y las sociedades dificulta la predicción de las reacciones de cada uno de ellos al alza de las temperaturas. Con todo, algunos expertos han hallado ciertas relaciones: un trabajo publicado en 2015 en *Proceedings of the National Academy of Science USA* observó que el cambio climático había inflamado la guerra civil de Siria al haber causado una sequía más pertinaz de lo habitual en la región. Ello, sumado a la negativa del Gobierno a compensar las cosechas fallidas y los rebaños muertos, hizo que cientos de miles de ciudadanos migraran desde el campo hasta las ciudades como Alepo y Al Raqa. A las protestas desatadas en el país a inicios de 2011 se unió mucha gente desesperada que guardaba un gran rencor hacia la clase gobernante. Los tumultos dieron paso a la guerra fratricida en el momento en que el Gobierno comenzó a disparar contra los manifestantes en un conflicto que ha permitido que el autoproclamado Estado Islámico de Irak y Siria se alce en armas y aterrorice al mundo.

El Ejército de EE.UU. no achaca al cambio climático el papel de detonante directo de los conflictos bélicos, pero sí lo califica como un «acelerador de la inestabilidad» o un «multiplicador de amenazas». Tales fórmulas aparecen en el Informe Cuatrienal de Defensa del departamento, su principal documento de planificación para los próximos cuatro años. También se indican al inicio de su Hoja de Ruta de Adaptación al Cambio Climático de 2014, un análisis estratégico sobre cómo comenzar a afrontar las amenazas climáticas.

El pasado enero, el departamento publicó una directiva según la cual los dirigentes deben evaluar y planificar los riesgos derivados del cambio climático. Se prevé que la asistencia humanitaria y la respuesta a los desastres, antaño esporádicas, formen parte de casi todos los despliegues, dado el notable auge que las catástrofes naturales están experimentando en todo el planeta.

El Ejército no se ha convertido de la noche a la mañana en una rama del Cuerpo de Paz. Su misión consiste en salvaguardar los intereses de EE.UU. en todo el mundo. Pero la protección de las vidas puede evitar que países en dificultades acaben arruinados. La historia reciente demuestra que los estados fallidos, como Afganistán y Siria, representan peligros reales para la seguridad nacional debido a la desestabilización de las regiones y a la formación de terroristas que pueden amenazar a la ciudadanía estadounidense.

La preocupación ante el hecho de que el cambio climático engendre violencia no solo afecta al Departamento de Defensa estadounidense. En octubre de 2015, tres exsecretarios de defensa, dos exsecretarios de Estado y 40 senadores, jefes militares y expertos en seguridad nacional —republicanos y demócratas— publicaron en el *Wall Street Journal* una carta abierta en la que advertían de que el cambio climático estaba «dando forma a un mundo más inestable, de recursos limitados, violento y propenso al desastre».

El Ejército estadounidense se centra en dos grandes zonas donde el cambio climático podría desatar nuevos conflictos: África subsahariana y la costa pacífica de Asia. Además, vigila de cerca una tercera: el Ártico. Un cuarto escenario, Oriente Próximo, podría sumarse a la lista, pero al mando central le preocupa en estos momentos los conflictos en marcha en Siria, Irak, Yemen y Afganistán.

ÁFRICA: SEQUÍA Y TERRORISMO

A menudo los geógrafos consideran África como el continente más vulnerable ante la inestabilidad generada por el cambio climático, ya que allí la pobreza es generalizada, el grueso de sus habitantes depende de una agricultura de secano de subsistencia, las variaciones climáticas pueden ser extremas y la capacidad de muchos Gobiernos es escasa. Un cuadro al que se suman con frecuencia los brotes de enfermedades, las cosechas ruinosas, la rivalidad étnica y religiosa y la corrupción. Se prevé que la población del continente se disparará desde los actuales 1200 millones hasta alcanzar o superar el doble hacia mediados de siglo. Y la presión adicional ejercida por el cambio climático en este panorama sombrío podría acelerar las amenazas y abocar a la guerra a los Estados más frágiles.

De hecho, ya ha comenzado a suceder. En el norte de Nigeria, la deforestación, el sobrepastoreo y el ascenso de temperaturas asociado al calentamiento global han convertido lo que una vez fueron campos fértiles y sabana en una prolongación del Sáhara. El lago Chad ha perdido más del 90 por ciento de su extensión como consecuencia de la sequía, la mala gestión y los desechos. Tal cúmulo de factores, sumados a un Gobierno nigeriano tachado de irresponsable, ha condenado a sus habitantes a la pobreza y ha desatado un éxodo en busca de sustento y seguridad.







AMENAZAS: La sequía debilitó Nigeria y fortaleció al grupo terrorista Boko Haram, que secuestró a 276 niñas (*1*). Las tormentas destructivas, como el tifón Haiyán en Filipinas (*2*), pueden mermar la capacidad de las naciones del Pacífico para hacer frente a la actitud desafiante de China. La desaparición de la banquisa marina del Ártico amplía el territorio controlado por la flota rusa (*3*).


DAN KITWOOD, GETTY IMAGES (*manifestante*); EDGAR SU, REUTERS (*destrozos por el tifón*); HANNES RADA, GETTY IMAGES (*rompehielos*)

El violento grupo islamista Boko Haram se ha hecho fuerte en el vacío de miseria dejado por esta conjunción de factores. Y si bien al inicio su radio de acción se extendía por el norte de Nigeria, en marzo de 2015 el grupo prometió su unión al Estado Islámico, con lo que se ha convertido en una clara amenaza para los aliados y los intereses de Estados Unidos. Una concatenación de causas que abarca desde el cambio climático hasta la desertificación, y pasa por la inseguridad alimentaria, la migración y finalmente el conflicto han gestado el auge de Boko Haram.

La misión principal del mando militar estadounidense para África (AFRICOM) consiste en poner freno a las amenazas como Boko Haram y evitar la aparición de otras nuevas. (AFRICOM es uno de los seis mandos que el Ejército ha creado y distribuido geográficamente para abarcar el planeta. Aunque el Estado Mayor Conjunto de EE.UU. y el Secretario de Defensa establecen directrices generales, cada mando planea la mayoría de sus operaciones).

Los científicos saben que el calentamiento provocará en África condiciones meteorológicas extremas y mermará la disponibilidad de agua, lo que reducirá la producción de alimentos en lugares que ya sufren problemas de abastecimiento. El ascenso de la temperatura también ampliará las zonas de distribución de los mosquitos y, por ende, las de ciertas enfermedades. Todos estos fenómenos podrían, a su vez, agravar la pobreza y las migraciones y precipitar conflictos locales en torno a unos recursos cada vez más escasos, en una vorágine que minaría la estabilidad de los Estados y acabaría provocando levantamientos violentos que podrían servir como caldo de cultivo para grupos terroristas.

Una de las principales estrategias consiste en ayudar a construir Gobiernos e instituciones públicas responsables. Para ello es preciso saber qué países son más vulnerables a los conflictos ligados al cambio climático y destinar recursos para su consolidación.

Con ese fin, el Departamento de Defensa financió un estudio en 2014 integrado en el programa Cambio Climático y Estabilidad Política en África, de la Universidad de Texas en Austin. El trabajo identificó las regiones más vulnerables del continente. Los investigadores trazaron mapas detallados superponiendo el clima a otros elementos desestabilizadores; el resultado mostraba los puntos críticos con mayor riesgo de conflicto.

El pequeño Estado centroafricano de Burundi representaba una región particular. Y, en efecto, a inicios de 2015 estalló el conflicto cuando el presidente Pierre Nkurunziza trató de asumir un tercer mandato, a pesar de que la constitución los limita a dos. Las protestas y el intento de asonada causaron la muerte de casi 500 personas y la migración de un cuarto de millón. Un cúmulo de factores, entre ellos el cambio climático, habían propiciado que el conflicto fuera más probable en un país ya inestable. Pero la guerra civil no estalló porque el Ejército burundés se mantuvo neutral. Y esa neutralidad fue en parte el legado del Ejército estadounidense, que había entrenado, equipado y reformado las fuerzas armadas del país a lo largo de una década.

Puesto que las fuerzas estadounidenses no cuentan con muchos efectivos sobre el terreno ni grandes flotas en las aguas de África, los responsables del AFRICOM consideran su misión como un mando híbrido «civil-militar» en colaboración con otros organismos del Gobierno, como la Agencia para el Desarrollo Internacional, con el fin de afianzar las instituciones militares y civiles de los países africanos. Resulta irónico que una de las vías más eficaces para evitar que el cambio climático desencadene conflictos no guarde relación con las medidas ambientales.

EL PACÍFICO: MARES PROCELOSOS

La presencia del Ejército en el Pacífico dista de ser testimonial y en estos momentos está desplazando a la región aún más efectivos. El Departamento de Defensa reforzará los contingentes de la fuerza aérea y de la Armada, de modo que pasarán de ser el 50 por ciento en 2012 al 60 por ciento del total hacia 2020.

El mando militar para el Pacífico (PACOM) tiene más amenazas de las que preocuparse que las tradicionales, entre ellas el chantaje nuclear de Corea del Norte, los conflictos territoriales en los mares de China meridional y oriental, las tensiones sobre

el estatus político de Taiwán y el auge del poder militar chino. El cambio climático añade dos graves amenazas para los habitantes del Pacífico: tormentas más frecuentes e intensas causadas por unos océanos más cálidos y ascenso del nivel del mar. En conjunto, la evolución del clima podría poner en peligro a los pequeños Estados insulares como las islas Marshall, Tuvalu o Micronesia. El ascenso del mar podría anegar regiones agrícolas vitales, como el delta del Mekong, y las marejadas ciclónicas amenazan ya la viabilidad a largo plazo de grandes metrópolis como Shangái, Yakarta, Manila y Bangkok. En 2014, un año en el que no se batió ningún récord de frecuencia o intensidad de las tormentas (como sí ocurrió en 2013 y 2015), los desastres naturales afectaron a 80 millones de personas y causaron daños valorados en casi 60.000 millones de dólares, según la ONU.

El objetivo general del Ejército consiste en mantener la paz y la libertad de comercio y garantizar la ley internacional. Alcanzar esos objetivos en esta región de economía incipiente supone una tarea ardua. A los responsables castrenses les preocupa sobre todo la rápida expansión de las fuerzas navales chinas y su creciente actitud desafiante, a la que, si nadie pone freno, podría dejar en sus manos el control de las aguas de la región. Más de la mitad del comercio marítimo mundial atraviesa el mar de China meridional, donde este país está construyendo bases militares en islas anexionadas que ha ampliado físicamente. Filipinas y otros países reclaman su derecho sobre algunas de esas islas, pero el Gobierno chino se reafirma en su soberanía.

El cambio climático constituye un factor relevante en la estrategia estadounidense a la hora de entablar alianzas en la región. Ante desastres naturales como los tifones, cada vez más intensos debido al cambio climático, la Armada de EE.UU. es a menudo la única fuerza dotada de la experiencia y la capacidad logística necesarias para desplegar con rapidez el personal y los medios materiales suficientes después de una catástrofe. La Armada china carece de tal capacidad y rara vez su país presta ayuda a naciones del Pacífico cuando sobrevienen acontecimientos de esa naturaleza. Estados Unidos ha afianzado alianzas con países del Pacífico interviniendo cuando más lo han necesitado.

En noviembre de 2013 se produjo un ejemplo dramático. El tifón Haiyán azotó Filipinas con vientos de 300 kilómetros por hora. La tormenta hizo que el mar penetrara tierra adentro hasta alcanzar los 14 metros de altura en algunos puntos. Murieron más de 7000 personas, una cifra que concedió a Haiyán el dudoso título de tifón más letal de la historia del país. En los días posteriores a la tormenta la gente aguardaba con desespero la ayuda. Según informes fidedignos, el Nuevo Ejército del Pueblo, brazo armado del Partido Comunista de Filipinas, atacaba los convoyes del Gobierno con suministros de socorro destinados a zonas remotas. En la ciudad de Taclobán murieron asesinadas ocho personas y se sustrajeron más de 100.000 sacos de arroz de un almacén del Gobierno. Se estaba desatando el caos.

Como respuesta, el secretario de Defensa Chuck Hagel, ordenó al grupo de combate del portaaviones *George Washington*, en ese momento en el puerto de Hong Kong, que «se dirigiera a toda marcha» a Filipinas. Cuando el portaaviones arribó, 13.000 soldados, marinos, aviadores e infantes de marina suministraron víveres, agua y otros materiales básicos. Su presencia puso fin a la violencia callejera y rompió la cadena de acontecimientos que conduce del cambio climático al conflicto.

Menos de seis meses después, el presidente Barack Obama visitó Manila para firmar un Acuerdo de Cooperación de Defensa Reforzada que afianzaría la alianza entre ambos países. Sin duda una de las principales razones para firmarlo era contrarrestar la contundencia de China en su reivindicación y ocupación de islas en el mar de China meridional. Pero la rápida respuesta ante Haiyán les recordó al Gobierno y a la población filipina, históricamente reticentes a la hora de cerrar acuerdos militares con EE.UU., por qué es importante contar con el apoyo de la Armada.

Si queremos que los esfuerzos de EE.UU. contrarresten la presencia de China, en Asia es fundamental cementar alianzas. El almirante Samuel Locklear, comandante del PACOM retirado, afirmó en 2013 que el cambio climático podría «alterar el clima de seguridad» en el Pacífico y desetabilizar la región. Si un país aliado teme continuamente la llegada de un tifón, es poco probable que invierta en las fuerzas navales necesarias para afrontar las amenazas de seguridad tradicionales, como la expansión territorial de una potencia emergente.

Entre las actividades del PACOM figuran eventos anuales de alto nivel, como el Foro de Seguridad Ambiental del Pacífico, que permiten la coordinación de las redes de comunicación entre el estamento militar y civil y ayudan a conectar entre sí al personal militar, los trabajadores humanitarios, las autoridades locales y la ONU. Las fuerzas armadas estadounidenses también están ayudando a formar militares de la zona del Pacífico para luchar y derrotar al enemigo a través de proyectos como RIMPAC, Cobra Gold y Balikatan. En maniobras conjuntas se simulan desembarcos anfibios, combates navales y operaciones de defensa aérea. Ahora tales ejercicios multilaterales incluyen, además, misiones de asistencia humanitaria.

Las condiciones meteorológicas extremas pueden agravar la pobreza y desatar revueltas que acabarían desestabilizando las naciones y actuando como caldo de cultivo para el terrorismo. EE.UU. trata de romper esa cadena de acontecimientos

EL ÁRTICO: VULNERABLE A LA AGRESIÓN

El compromiso de EE.UU. en el Ártico es distinto. Este océano se calienta más rápido que ningún otro lugar de la Tierra. En menos de una década ha sufrido una transformación notable: ha dejado de ser un mundo oceánico, preso del hielo, para convertirse en un mundo abierto a la explotación humana. El casquete polar ha menguado hasta tal punto que tanto la ruta del Norte como el paso del Noroeste, en Canadá, quedan hoy abiertos a la navegación y a la búsqueda de recursos energéticos durante buena parte del año. De hecho, el rápido derretimiento de la banquisa en 2007 fue uno de los precipitantes que llevaron a las fuerzas armadas a reflexionar sobre las implicaciones de la seguridad climática, ya que la Armada se hallaba ante un nuevo océano que debía vigilar. Irónicamente, los preparativos ante la repercusión del cambio climático en la seguridad de ese rincón del mundo parecen de todo punto insuficientes.

Del Ártico se encarga el mando militar para el Norte (NORTHCOM), si bien el mando europeo (EUCOM) tiene mu-

cho que decir, puesto que en él recaería toda acción militar que involucrase a Rusia, la fuerza hegemónica en sus aguas. En muchos sentidos, ambos mandos afrontan una serie de desafíos tradicionales en materia de seguridad: rivalidades entre grandes potencias donde se solapan reivindicaciones de recursos y disputas sobre la libertad de navegación.

A escala mundial se ha desatado una fiebre por asegurar las fuentes de petróleo y gas que, según el Servicio Geológico de Estados Unidos, se hallan bajo el mar. Las navieras se apresuran a botar barcos que puedan surcar el Ártico. Y países lejanos como India y Singapur tratan de unirse al Consejo del Ártico, un organismo internacional formado por los ocho países que bordean o poseen territorios en él con el fin de defender sus intereses.

En noviembre de 2013, al inicio de las disputas en torno al Ártico, el Departamento de Defensa de EE.UU. diseñó una estrategia para atenuar tensiones futuras a través de la diplomacia y otorgando más poder a las instituciones transnacionales.

En teoría, el Ártico está sometido a un riguroso ordenamiento jurídico internacional; las reclamaciones territoriales en su seno están reguladas por la Convención de la ONU sobre el derecho marítimo. El Consejo del Ártico está ampliando su influencia admitiendo a nuevos Estados en calidad de observadores, como China, Italia, Japón e India. Sin embargo, el poder de las instituciones está limitado. La Armada de EE.UU. se enfrenta en la zona a un competidor con más recursos y ambición: la flota rusa del Norte. Con base en Severomorsk, en el mar de Barents, es la principal fuerza naval del país. Controla la mayor flota de buques rompehielos del planeta y ha botado el que será el mayor y más moderno de ellos, propulsado por energía nuclear.

A instancias del propio presidente Vladimir Putin, el Ejército ruso ha creado un mando estratégico conjunto para el Norte destinado a proteger los intereses nacionales en el círculo polar Ártico. Este ha reabierto las bases de la Guerra Fría a lo largo de la costa ártica de Rusia, como la de la isla Wrangel, a menos de 500 kilómetros de Alaska. Los bombarderos de largo alcance que podrían poner a prueba las defensas antiaéreas de EE.UU. y Canadá se están modernizando. Y cabe reparar en que Putin ha mostrado un notable desdén hacia las fronteras y las normas internacionales en su reciente conflicto con Ucrania. Pocos habrían vaticinado que Rusia invadiría y se anexionaría Crimea. China también ha mostrado un creciente interés por el Ártico, y en 2012 envió su rompehielos *Snow Dragon* a través del paso del Noroeste en un viaje a Islandia anunciado a los cuatro vientos.

A pesar de tales presiones, el mando estadounidense no ve la necesidad de contar con fuerzas navales de superficie al norte del estrecho de Bering y sostiene que puede cumplir su misión de vigilancia con submarinos. La estrategia se está poniendo a prueba mientras, en cambio, Rusia y China llevan a cabo maniobras en el Ártico a la vista de todos. Estados Unidos podría contrarrestarlas reforzando su presencia en la zona con visitas a Islandia y ejercicios con la OTAN. La historia demuestra con tozudez que si otras potencias no frenan la expansión de una nación poderosa que reclama más territorio, más aguas o más recursos naturales, su expansión no cesa hasta que estalla la guerra.

Aun así, el NORTHCOM se muestra reacio a reforzar su presencia en el Ártico, en parte por motivos económicos. Las operaciones en la zona serían sumamente costosas. De momento, la Armada no posee la infraestructura, los navíos o la ambición política para mantener allí operaciones de superficie. El servicio de guardacostas solo dispone de dos rompehielos y uno, el *Polar Star*, tiene 40 años. En su visita a Alaska en septiembre de 2015, el presidente Obama anunció planes para construir uno nuevo hacia 2020, un proyecto que podría superar los 800 millones de dólares. En un contexto de estrechez presupuestaria, en el que hasta el Ejército debe pelear para obtener fondos, ningún almirante osa proponer una nueva misión costosa.

Ante la disparidad de medios, quizás el Ejército considere la diplomacia y la cooperación como canales eficaces en términos de coste para asegurar que se escuchen los intereses del país. Pero en el Congreso hay quien critica esa moderación por creerla excesiva. El senador por Alaska Dan Sullivan, miembro del Comité del Senado para las Fuerzas Armadas, ha presionado repetidamente a la administración de Obama para que destine más recursos militares al Ártico. Hace poco, Sullivan ha convencido al secretario de Defensa, Ashton Carter, de la necesidad de concebir un programa que determine las fuerzas precisas para proteger los intereses nacionales ante un conflicto en la zona.

Así las cosas, de momento las fuerzas armadas apenas han reforzado su presencia al norte del círculo polar, a pesar de que sus competidores están movilizando notables recursos en la región.

¿SE PREOCUPARÁ EL PRÓXIMO PRESIDENTE?

A los expertos en seguridad nacional y en política internacional les ha llevado tiempo persuadir al Ejército de que se prepare ante el cambio climático. La pregunta es si esos esfuerzos no caerán en saco roto cuando el próximo presidente asuma el cargo en enero de 2017. Por desgracia, el cambio climático sigue estando politizado y muchos republicanos lo ignoran por completo.

Otro problema acuciante es saber si se destinará suficiente dinero a las medidas relacionadas con el clima. La situación en el Ártico no es alentadora. La principal fuente de fondos para las labores de asistencia civil efectuadas por el Departamento de Defensa procede del programa de Ayuda Internacional Humanitaria para Desastres y Asuntos Cívicos, cuya asignación anual se ha reducido a cien millones de dólares a pesar de la ampliación del proyecto.

Al final, la verdad siempre se impone: el clima está cambiando y los mandos militares tendrán que afrontar sus consecuencias. Sin duda, vale más trazar de antemano un plan contra las amenazas que tomar medidas paliativas una vez ocurrido el desastre. El Ejército no sufrirá ningún ataque sorpresa por parte del cambio climático hoy mismo. Y al menos, dos de los seis mandos militares están comenzando a encarar la amenaza. Pero no es seguro que eso baste para romper la cadena de causalidad que vincula el cambio climático con el conflicto. IyC

PARA SABER MÁS

Climate security report. Catherine Foley y Andrew Holland. American Security Project, 2012. **www.americansecurityproject.org/climate-security-report**

2014 climate change adaptation roadmap. Departamento de Defensa de EE. UU. Junio de 2014.

Response to congressional inquiry on national security implications of climate related risks and a changing climate. Departamento de Defensa de EE.UU. Julio de 2015. **http://archive.defense.gov/pubs/150724-congressional-report-on-national-implications-of-climate-change.pdf**

EN NUESTRO ARCHIVO

Víctimas del cambio climático. Alex De Sherbinin, Koko Warner y Charles Ehrhart en *IyC*, marzo de 2011.

Los refugiados sirios, víctimas del cambio climático. John Wendle en *IyC*, mayo de 2016.

por Marcos Moleón y Jesús Bautista-Rodríguez

Salvar el águila monera de Filipinas

El seguimiento y una gestión adecuada de sus poblaciones evitarían la extinción de esta singular especie

Filipinas atesora una de las mayores diversidades biológicas del planeta. Sin embargo, uno de los endemismos más emblemáticos del archipiélago, el águila monera (*Pithecophaga jefferyi*), se halla al borde de la extinción.

El primero en describir la especie fue el explorador y naturalista inglés John Whitehead, en 1896. Lamentablemente, hoy apenas podría reconocer las islas. Las extensas áreas de selva tropical que cubrían entonces su superficie se están viendo mermadas por la asfixiante presión humana. Desde que, hace ya más de medio siglo, el científico filipino Dioscoro Rabor alertara sobre la delicada situación del águila, el azote de la deforestación y la sobrecaza no ha cesado. Por desgracia, las diversas iniciativas nacionales e internacionales emprendidas desde entonces para frenar el declive de la especie apenas han tenido éxito.

Las serias dificultades logísticas que conlleva trabajar en las escarpadas y densas selvas que aún quedan en pie, junto con los continuos problemas entre el Gobierno y la insurgencia, que impiden la entrada de personal investigador y técnico en las regiones de mayor conflicto, dificultan la realización de censos precisos. Según la Fundación del Águila Filipina, hoy el número de territorios ocupados con certeza por la especie en todo el archipiélago es de únicamente 33.

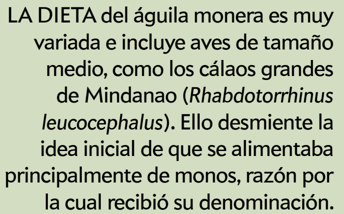
A finales de 2009, un grupo de biólogos y naturalistas españoles formado por los autores, Javier Martín-Jaramillo y Francesc Parés nos desplazamos hasta la isla de Mindanao con el fin de colaborar en las tareas de seguimiento y conservación del águila. Nos centramos en aspectos biológicos básicos de la especie, como la distribución y el tamaño poblacional, la ecología trófica y reproductora, la diversidad genética o los movimientos de los individuos dispersantes. Los resultados preliminares indican que las águilas se alejan poco de los territorios donde nacieron, lo que quizá se deba a su dificultad para hallar un nuevo hábitat donde propagarse. Estudios como este resultan esenciales para poder diseñar medidas de gestión que garanticen el futuro de la especie.

—Marcos Moleón
Estación Biológica de Doñana (CSIC)
—Jesús Bautista-Rodríguez
Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Junta de Andalucía



EL ÁGUILA MONERA filipina es la más amenazada de entre todas las grandes águilas del planeta. Taxonómicamente, es la única representante de su género, lo cual significaría una pérdida aún más dramática en términos evolutivos y ecológicos.

EL PENACHO DE PLUMAS de la cabeza, aquí plegado, podría cumplir una función doble: bien como amplificador de los sonidos de congéneres o presas, algo muy útil en la espesura de la selva, o bien como herramienta de comunicación social.



LA DIETA del águila monera es muy variada e incluye aves de tamaño medio, como los cálaos grandes de Mindanao (*Rhabdotorrhinus leucocephalus*). Ello desmiente la idea inicial de que se alimentaba principalmente de monos, razón por la cual recibió su denominación.

LA DESTRUCCIÓN y la fragmentación de la selva tropical en Filipinas merman el hábitat del águila. A ello contribuyen la explotaciones del aceite de palma (*arriba*) y la agricultura migratoria de tala y quema, el *kaingin* (*derecha*), así como la extracción de madera para su exportación. Además, la caza está menguando las poblaciones de presas naturales y de las propias águilas.

por Javier Moscoso



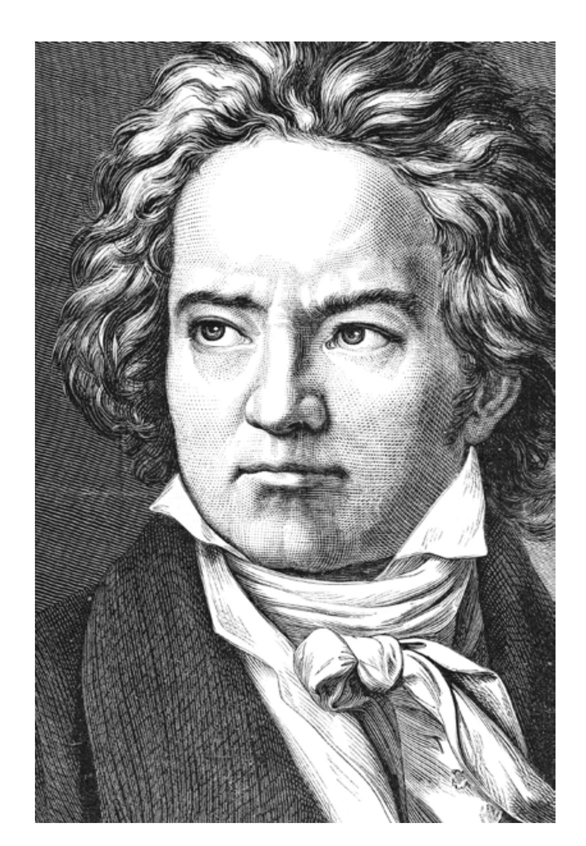
Javier Moscoso es profesor de investigación de historia y filosofía de las ciencias en el Centro de Ciencias Humanas y Sociales del CSIC, en Madrid.

Historia de las emociones y cambio social

La evolución de la sociedad y la cultura está ligada a nuestra capacidad de cambiar la forma de sentir y expresar las emociones

Los historiadores de la música sostienen que Beethoven consolidó su fama cuando, en el año 1800, su compatriota Daniel Steibelt lo retó a un duelo musical en la casa del príncipe Lobkowitz. Estos duelos entre virtuosos, típicos de la Europa de la época, no solo examinaban la habilidad de los pianistas en el teclado, sino también su capacidad para improvisar a partir de algunas pocas notas. Según los cronistas, la interpretación de Steibelt fue magnífica y celebrada con una gran ovación por parte de los asistentes. Cuando le llegó su turno, Beethoven se acercó al piano con desgana; miró con desprecio la partitura que Steibelt había colocado en el piano y la mostró a la audiencia. Sin pronunciar una sola palabra, la colocó boca abajo sobre el atril y comenzó a tocar tomando como punto de partida las primeras cuatro notas de la pieza de su contrincante. Comenzó por embellecerlas, por adornarlas, por recrearlas y reorientarlas. Su interpretación también incluyó algunos de los elementos más queridos del repertorio romántico, y no faltó tampoco alguna burla a los temas favoritos de su rival. Sabiéndose derrotado, Steibelt abandonó la sala airado, jurando que no regresaría a Viena mientras Beethoven permaneciera allí. El músico de Bonn, que no volvió a participar en ninguno de estos duelos musicales, nunca abandonó la ciudad y Steibelt, cumpliendo su palabra, murió en San Petersburgo sin haber vuelto jamás a poner los pies en la capital del Imperio.

La importancia de la improvisación, aunque asociada con frecuencia a la música y a las artes escénicas, concierne también a otros muchos ámbitos de la vida social, incluida la capacidad que tenemos los humanos para no seguir siempre ni en todo momento las reglas por las que sentimos y expresamos nuestras emociones. La interpretación de Steibelt no tenía nada de improvisada. Como tampoco lo tenía la acritud con la que aceptó su derrota. Su juramento solemne pertenecía a las formas ritualizadas del honor propias de la Europa de finales del siglo XVIII; un comportamiento impensable en el contexto de la educación musical de comienzos del siglo XXI. Tanto en su interpretación escénica como en su actitud social, el joven pianista berlinés se comportó de acuerdo con unas formas culturales aprendidas que chocaron con la creatividad musical y emocional de su rival, capaz de improvisar tanto dentro como fuera del escenario.



LA RUPTURA DE LA NORMA y la improvisación emocional fueron elementos clave de la enorme capacidad creativa de Beethoven.

Pese a los muchos desacuerdos que todavía envuelven a quienes han dedicado su vida al estudio de las emociones humanas, existe un acuerdo generalizado a la hora de definirlas como *hábitos sobreaprendidos* que, en muchos casos, actúan por debajo del umbral de la consciencia. Como quien toca una pieza al piano o habla una lengua distinta de la suya materna, las emociones se desencadenan en muchos casos de manera automática y fuera de umbral de la atención. Eso no quiere decir que nuestros estados emocionales no puedan percibirse. Antes al contrario, las reacciones del cuerpo pueden traducirse en sentimientos conscientes, e incluso consolidarse en formas de ser, como cuando decimos de alguien que es más bien jovial, obsesivo, iracundo o melancólico. Por otro lado, aun cuando las emociones se sirven del sistema nervioso, del sistema límbico y de otros elementos de nuestra estructura morfológica, no por eso pueden considerarse universales.

Durante los años setenta y ochenta del siglo XX, los investigadores Stephen Toulmin y Paul Ekman quisieron hacernos creer que las experiencias estaban tan ancladas en la historia natural de la evolución que podíamos establecer un número fijo de emociones básicas. Si

pudiéramos encontrar una forma neutra, puramente mecánica, de desencadenar algunas respuestas gestuales, razonaban estos investigadores, no habría ninguna diferencia significativa en la manera en que dos personas, de dos contextos históricos o culturales diferentes, expresarían sorpresa, miedo o indignación. A la manera de los estudios pioneros de Charles Darwin en los años setenta del siglo xix sobre la expresión de las emociones en los humanos y en los animales, Paul Ekman sostenía que las modificaciones expresivas no eran naturales, sino meras perturbaciones culturales. Para desgracia de Ekman, los músculos cigomáticos que regulan la sonrisa no bastan por sí mismos para explicar la enorme diversidad expresiva de los humanos, del mismo modo que tampoco servirían para explicar el enfado de Steibelt.

Aunque tanto las corrientes más biologicistas como las más culturalistas coinciden en hacer depender las variaciones emocionales de factores aleatorios, ninguna de las dos, sin embargo, ha logrado ofrecer una explicación solvente de cómo se produce esa divergencia. En el primer caso, los partidarios de teorías biologicistas hallan dificultades a la hora de interpretar las diferencias gestuales en formas expresivas que deberían ser (naturalmente) idénticas; en el segundo, los culturalistas deben enfrentarse al reto de comprender la manera en que algunos miembros de una determinada comunidad emocional se resisten a comportarse de acuerdo con patrones sociales aprendidos. Las formas históricas de la experiencia amorosa, por ejemplo, han sufrido enormes variaciones. Pero a la obvia evidencia de que ni siguiera dos generaciones sucesivas sienten o expresan su amor de la misma manera, habría que añadir la incómoda circunstancia de que seguimos sin saber por qué razones se modifican las pautas normativas que permiten que los castellanos, por ejemplo, no sigamos enamorándonos «de oídas», tal y como sucedía en el amor cortés de los libros de caballerías y las canciones de gesta. Y lo mismo podría decirse en relación al miedo, la admiración o la ira.

Tanto si hablamos de formas expresivas como del contenido de la experiencia, la ciencia debe dar cuenta de la forma más o menos improvisada en la que algún individuo, o un conjunto de ellos, decide saltarse las reglas, ya entendamos que estas reglas sean resultado de la evolución o de la cultura. ¿Por qué ante la injusticia flagrante no todas las personas, ni siquiera todas las pertenecientes a la misma familia o al mismo grupo, responden de la misma manera? ¿Por qué no todo el mundo reacciona ante los estímulos del miedo de igual modo? Como muy bien sabía Beethoven, la improvisación, que normalmente asociamos al ámbito de las artes, informa nuestras manifestaciones culturales y nuestros modos de vida. Esa independencia puede explicar en ocasiones el comportamiento violento, pero

La improvisación que parte de la ruptura más o menos deliberada de las reglas también configura nuevos modelos de conducta

también puede servir, al contrario, para buscar formas razonadas de conducta. La improvisación que parte de la ruptura más o menos deliberada de las reglas también configura nuevos modelos de conducta. En cierto sentido, improvisar consiste en expresar una excepción creativa que, de darse las condiciones, puede, a su vez, convertirse en norma.

Las emociones se relacionan con el cambio social en dos sentidos. En el primer caso, las condiciones contextuales favorecen respuestas emocionales diversas. En el segundo, algunas modificaciones en las pautas emocionales potencian formas diferentes de acción social. En ambos casos, la improvisación que podríamos denominar «emocional» interesa por igual a economistas, politólogos, sociólogos y antropólogos. También a historiadores y filósofos. Algunos de estos últimos ya comenzaron a trabajar sobre los enigmas de la improvisación a comienzos del siglo xx, mucho antes de que las teorías del cambio social estuvieran dominadas por interpretaciones de naturaleza mecánica. Sus preguntas tenían una formulación sencilla: ¿Es posible improvisar? ¿En qué medida la creatividad se relaciona con las formas imitativas sobre las que se apoya la idea misma de la cultura? ¿Parte la improvisación de algunos elementos ya dados? ¿Hay reglas de improvisación? Desde el punto de vista de los estudios históricos, la dificultad consistirá en determinar la relación entre ruptura y tradición, creación y memoria. Para los politólogos y los filósofos políticos, la improvisación siempre estará asociada a las formas históricas de la libertad, y vendrá a significar un espacio indeterminado en el que las cosas siempre podrían, pueden, o hubieran podido ser, de otra manera.

Pero la improvisación no solo define un problema, sino que establece un campo de investigación que alberga ciencias y disciplinas variadas, tanto naturales como sociales, tanto cuantitativas como comprensivas o históricas. Su estudio es uno de los mejores ejemplos relacionados con la investigación cooperativa de comienzos del siglo xxi. Por un lado, el estudio de las formas de improvisación no puede hacerse sin el concurso de las artes, esencialmente de las artes performativas y escénicas, pero también de las visuales y las plásticas. Por el otro, nadie se tomaría en serio una investigación sobre improvisación que no tuviera en cuenta la aportación, por ejemplo, de las neurociencias. De las nuevas formas de visualización en anatomía funcional sabemos que la improvisación está relacionada con cambios en la actividad prefrontal del cerebro distintos a los que pueden observarse en la interpretación de música aprendida. Por sí sola, esos datos no permiten comparar a Beethoven con Steibelt, pero sí nos dan pistas para rastrear las condiciones que hacen posible, en algunos casos, la ruptura de la norma y la aparición de elementos emocionalmente creativos. MyC

PARA SABER MÁS

Improvisation and the creative process: Dewey, collingwood, and the aesthetics of spontaneity. R. Keith Sawyer en *The Journal of Aesthetics and Art Criticism*, vol. 58, n.º 2, págs. 149-161, Primavera de 2000.

Improvised performance: Performers' perspectives; Music and language cognition compared II: Production. Aaron Berkowitz en *The improvising mind: Cognition and creativity in the musical moment*, págs. 121-144; 45-52. Oxford University Press, Nueva York, 2010.

The philosophy of improvisation. Gary Peters. Chicago University Press, Chicago, 2011.

La historia de las emociones, ¿de qué es historia? Javier Moscoso en *Vínculos de Historia Contemporánea*, n.º 4, págs. 15-27, 2015.

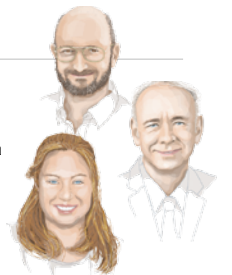
EN NUESTRO ARCHIVO

Emoción y razón. Sabine A. Döring en «Emociones», colección *Cuadernos* de *MyC* n.º 2, 2012.

¿Qué significa sentir? Giovanni Frazzetto en *MyC* n.º 64, 2014.

por Howard Baer, Vernon D. Barger y Jenny List

Howard Baer es catedrático de física de altas energías de la Universidad de Oklahoma. **Vernon D. Barger** es catedrático de física de la Universidad de Wisconsin-Madison. **Jenny List** trabaja como física experimental en el laboratorio DESY, en Hamburgo.



El acelerador que podría salvar la física

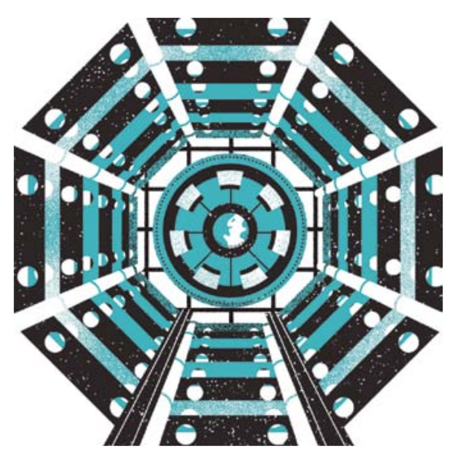
Un proyecto japonés aspira a resolver los misterios que escapan al LHC

En 2012, el hallazgo del bosón de Higgs en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN supuso la espectacular confirmación del modelo estándar, la teoría que describe todas las partículas elementales conocidas y sus interacciones excepto la gravedad. El higgs, cuya existencia fue predicha en los años sesenta, era la pieza que faltaba por descubrir. Pero, desde entonces, los físicos se han atascado: las partículas supersimétricas, las cuales ayudarían a resolver varios de los problemas del modelo estándar y que muchos esperaban ver en el LHC, no han aparecido.

Los expertos llevan décadas hablando de un acelerador capaz de encontrarlas. Hace tres años, un equipo internacional de físicos e ingenieros terminó su diseño. Conocido como Colisionador Lineal Internacional (ILC, por sus siglas en inglés), este coloso de 31 kilómetros de longitud haría chocar electrones y positrones bajo las montañas de la región de Kitakami, al norte de Japón. Esas aniquilaciones de materia y antimateria liberarían una energía de entre 250.000 y 500.000 millones de electronvoltios (250-500 GeV), con la posibilidad de duplicarla en una fase posterior. Se espera que, en breve, el ministro japonés de educación, cultura, deportes, ciencia y tecnología decida si el proyecto sigue adelante. En nuestra opinión, debería ser así.

El modelo estándar tenía un «agujero» en el que un bosón de Higgs con una masa de 125 GeV encajaba a la perfección (debido a la equivalencia entre masa y energía, la masa de las partículas suele expresarse en electronvoltios). Y eso fue precisamente lo que encontraron los científicos en el LHC. El problema radica en que nadie entiende por qué la masa del bosón de Higgs toma ese valor. Es más, desde los años ochenta, se sabe que los efectos cuánticos deberían hacer que la masa del higgs fuese muchísimos órdenes de magnitud mayor.

La supersimetría ofrece una solución. Este marco teórico postula una conexión subyacente entre las partículas de materia (quarks y leptones) y las que median las interacciones (fotones, gluones y bosones *W* y *Z*). También predice todo un abanico de nuevas partículas, las cuales han sido bautizadas con nombres tan exóticos como *squarks* (asociadas a los quarks) o *higgsinos* (relacionadas con el bosón de Higgs). Estas interaccionarían con las partículas del modelo estándar de tal forma que las correcciones cuánticas a la masa del higgs se cancelarían, dando como resultado una masa similar a la observada en el LHC.



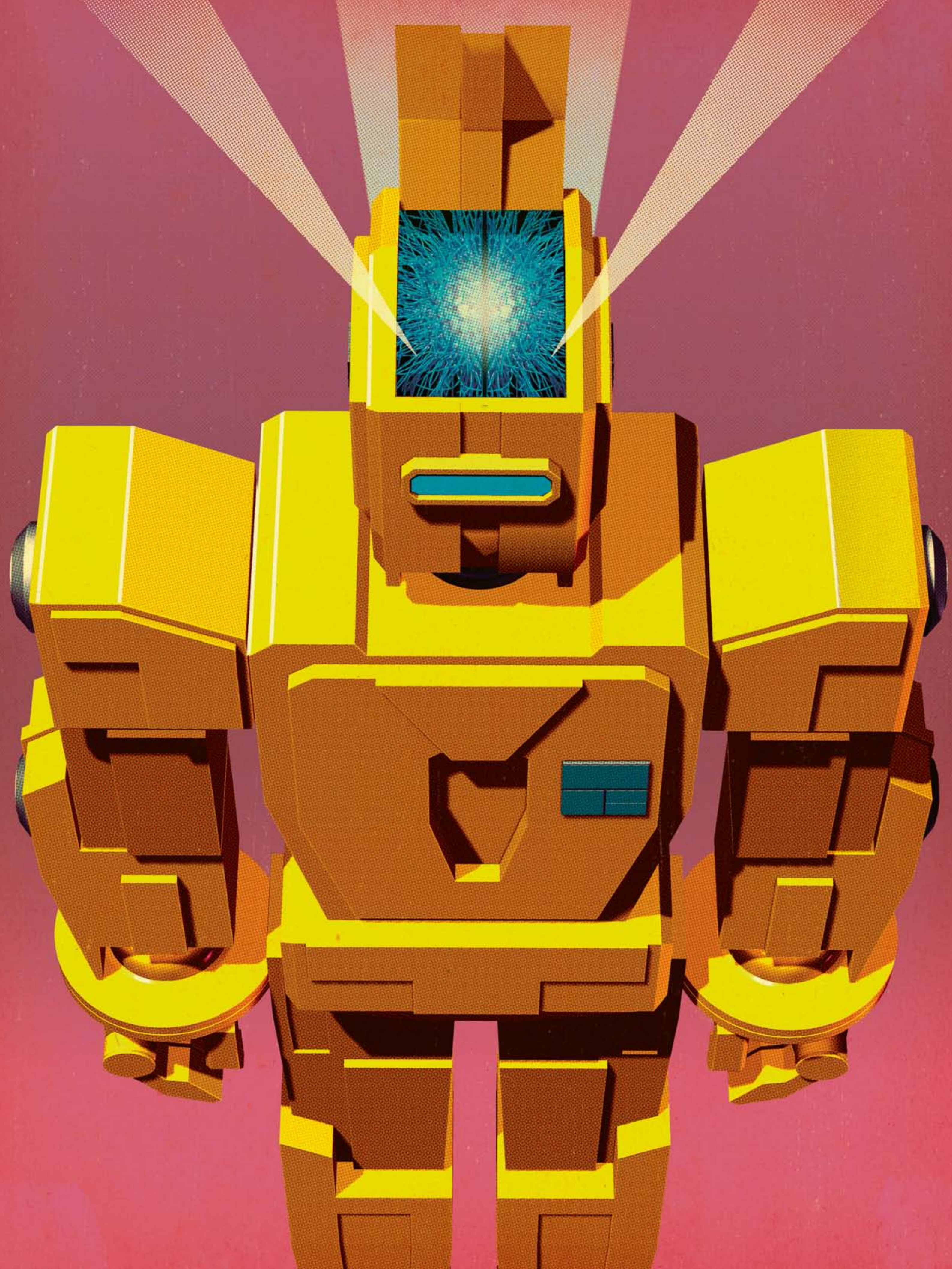
Muchos pensaban que las partículas supersimétricas aparecerían cuando el Gran Colisionador Electrón-Positrón (LEP), el predecesor del LHC en el CERN, comenzó a funcionar hace más de 25 años. No fue así. Y el hecho de que tampoco lo hayan hecho en el LHC, mucho mayor y más potente, ha aterrorizado a más de un físico [*véase* «La supersimetría y la crisis de la física», por Joseph Lykken y Maria Spiropulu; Investigación y Ciencia, abril de 2015].

Con todo, aún hay esperanzas. Algunas investigaciones teóricas recientes sugieren que los higgsinos estarían al alcance del LHC, solo que ocultos en la maraña de partículas generadas en los choques protón-protón que lleva a cabo el acelerador. Es aquí donde destaca el ILC. Sus colisiones serían menos energéticas que las del LHC, pero tendrían lugar entre electrones y positrones. A diferencia de los protones, que son partículas compuestas (por quarks y gluones), los electrones y los positrones son elementales. Como consecuencia, las colisiones serían mucho más limpias y las señales de los posibles higgsinos podrían identificarse con facilidad.

La construcción del ILC costaría 10.000 millones de euros, aproximadamente el doble que la del LHC. De hecho, esa cifra probablemente sea inasumible para cualquier país, por lo que la participación internacional resultará clave. Pero merecerá la pena.

Varias consideraciones teóricas apuntan a que el ILC debería producir higgsinos, sleptones (los supercompañeros de los leptones) y otras partículas. De ser el caso, el ILC confirmaría la supersimetría, un modelo del mundo subatómico que hace tiempo que los físicos tienen por cierto. Además, debido a que los higgsinos podrían constituir al menos una parte de la materia oscura que llena el cosmos, su detección contribuiría a resolver uno de los grandes misterios pendientes de la astrofísica. Y si, a pesar de todo, las partículas supersimétricas siguen sin aparecer, la ciencia habrá avanzado igualmente, ya que los teóricos de altas energías redirigirán su atención a otras posibilidades. Sea como sea, lo que aprendamos contribuirá a nuestra comprensión de las leyes de la naturaleza y nos ayudará a entender sus implicaciones sobre el origen y la evolución del universo.

JAMES OLSTEIN



LA EDAD DE ORO DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Las esperanzas que suscitan los vehículos sin conductor y las nuevas técnicas de aprendizaje y razonamiento automatizado han hecho resurgir la inteligencia artificial. Y también han avivado el miedo a que algún día las máquinas puedan volverse contra nosotros

ILUSTRACIONES DE TRAVIS COBURN

REDES NEURONALES

APRENDIZAJE PROFUNDO

Tras años de decepciones, la inteligencia artificial está empezando a cumplir lo que prometía en sus comienzos gracias a esta potente técnica

Yoshua Bengio



EN LA DÉCADA DE 1950, LAS COMPUTADORAS SUSCITARON UN gran entusiasmo al demostrar teoremas matemáticos y derrotar a seres humanos en partidas de damas. En los años sesenta creció la esperanza de que los científicos emulasen pronto el cerebro humano con ordenadores y programas; se creía que la «inteligencia artificial» (IA) no tardaría en igualar el rendimiento humano en cualquier tarea. En 1967, el recientemente fallecido Marvin Minsky, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, vaticinó que el reto de la IA se superaría en el plazo de una generación.

Sin embargo, tal optimismo resultó prematuro. Aquellas expectativas no fueron colmadas ni por los programas que ayudaban a los médicos a efectuar mejores diagnósticos ni por las redes que tomaban como modelo el cerebro humano para reconocer el contenido de una fotografía. Los algoritmos de esos primeros años no eran lo suficientemente refinados, y necesitaban una cantidad de datos de la que no se disponía en la época. Además, la capacidad de computación era demasiado limitada para que las máquinas realizasen los ingentes cálculos necesarios para aproximarse a la complejidad del pensamiento humano.

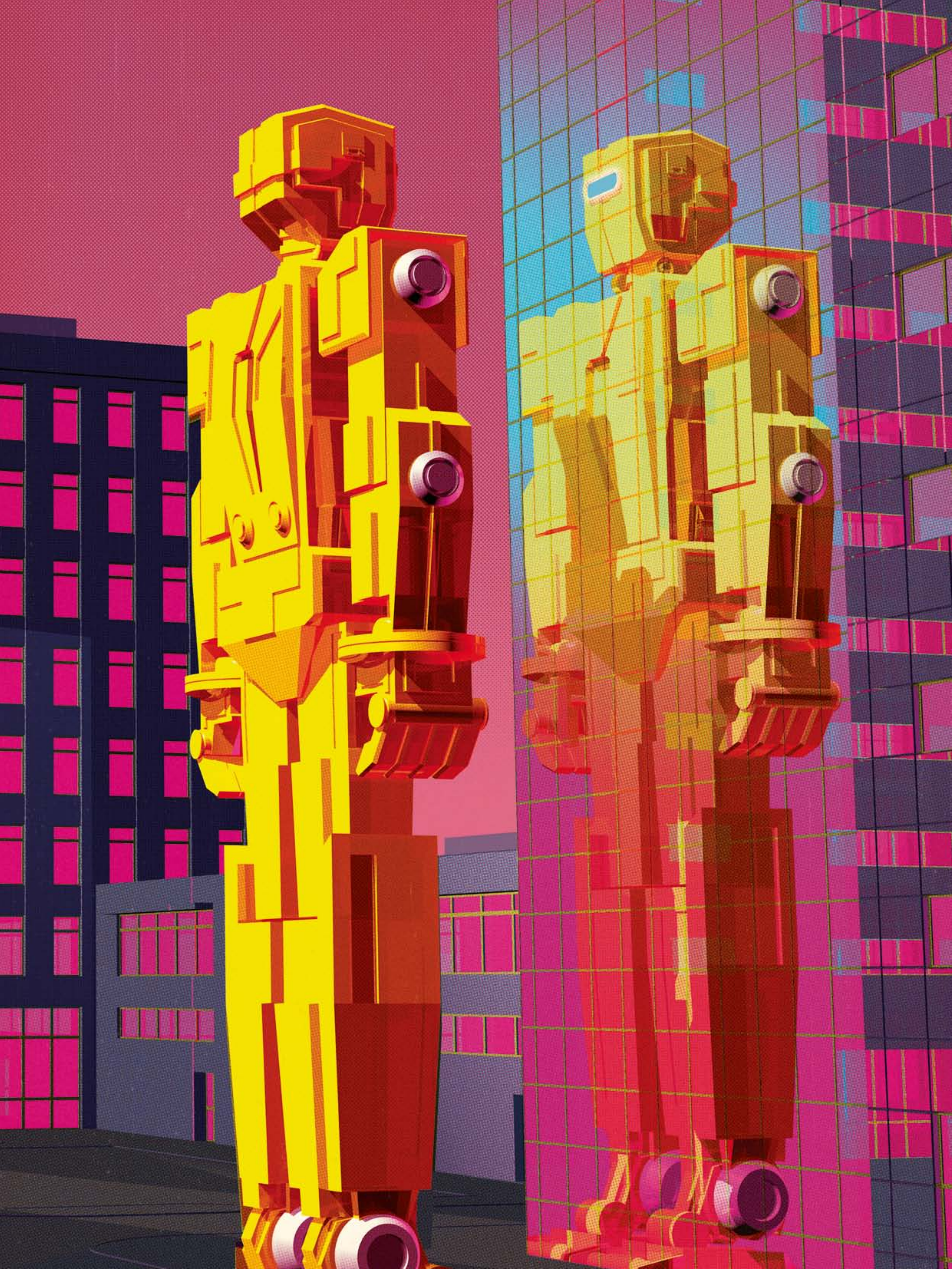
EN SÍNTESIS

La inteligencia artificial (IA) apareció como disciplina seria en la década de 1950. Entonces los investigadores creyeron que podrían emular la inteligencia humana en menos tiempo de lo que duraría su carrera.

Las esperanzas se desvanecieron cuando quedó claro que los algoritmos y la potencia de cómputo no bastaban para culminar la tarea. Algunos consideraron que el intento era un acto de pura arrogancia.

En los últimos años, el desarrollo de nuevas técnicas computacionales inspiradas en las redes de neuronas del cerebro humano ha resucitado la esperanza de materializar las promesas originales de la IA.

El aprendizaje profundo, una técnica que se vale de redes neuronales complejas, permite que una máquina aprenda conceptos abstractos. En algunas tareas ya se aproxima a lo que pueden lograr los seres humanos.



A principios del siglo xxi, el sueño de construir máquinas con un nivel de inteligencia humano casi se había desvanecido. Hasta la expresión «inteligencia artificial» parecía haber sido erradicada de las disciplinas serias. Para referirse a las truncadas esperanzas del período comprendido entre los años setenta y mediados de los años 2000, científicos y escritores hablan de una sucesión de «inviernos de la IA».

Es sorprendente cómo pueden cambiar las cosas en diez años. Las perspectivas en IA han mejorado notablemente desde 2005, época en que comenzaron a despuntar las técnicas de aprendizaje profundo: un enfoque para construir máquinas inteligentes inspirado en la neurociencia y que, en los últimos años, ha impulsado de manera singular la investigación en IA. Hoy, grandes empresas tecnológicas están invirtiendo miles de millones en su desarrollo.

«Aprendizaje profundo» es una manera de referirse a la simulación de redes de neuronas que «aprenden» gradualmente a reconocer imágenes, a comprender el lenguaje o incluso a tomar decisiones. Esta técnica descansa en las redes neuronales artificiales, un elemento básico de la investigación actual en IA. Dichas redes no imitan exactamente el funcionamiento del cerebro. En su lugar, se basan en principios matemáticos generales que, a partir de ejemplos, les permiten aprender a detectar personas u objetos en una fotografía o a traducir los principales idiomas del mundo.

El aprendizaje profundo ha transformado la investigación en IA y reavivado las ambiciones perdidas en visión computarizada, reconocimiento de voz, procesamiento del lenguaje natural y robótica. En 2012 se lanzaron los primeros productos que entendían el habla —quizás el lector esté familiarizado con Google Now— y poco después aparecieron aplicaciones que permitían identificar el contenido de una imagen, una característica hoy ya incorpora Google Photos.

Todo aquel que se haya sentido frustrado con los engorrosos menús telefónicos automatizados sabrá apreciar las extraordinarias ventajas de poder utilizar un buen asistente personal en su teléfono inteligente. Y quienes recuerden la pobre eficacia que mostraba el reconocimiento de objetos hace apenas unos años, cuando los algoritmos podían confundir un ser inanimado con un animal, se maravillarán con los progresos logrados en visión artificial. Hoy disponemos de ordenadores que, bajo ciertas condiciones, pueden discernir gatos, piedras o rostros en una fotografía casi tan bien como un humano. De hecho, los programas de IA se han convertido en algo imprescindible para millones de usuarios de dispositivos móviles. En mi caso, rara vez escribo mensajes de texto; a menudo me limito a hablarle al teléfono, que a veces incluso me responde.

Estos avances han abierto la puerta a la comercialización de una tecnología que cada vez despierta más entusiasmo. Las empresas compiten por los mejores profesionales, y alguien con un doctorado en aprendizaje profundo es una *rara avis* muy demandada. Numerosos profesores universitarios con experiencia en el campo —según algunos cálculos, la mayoría— han abandonado el ámbito académico atraídos por la industria, que ofrece excelentes medios de investigación y generosas retribuciones.

Solventar las dificultades que plantea el aprendizaje profundo ha conducido a éxitos sensacionales. Hace poco, la victoria de una red neuronal frente a Lee Sedol, uno de mejores jugadores de go del mundo, mereció grandes titulares. Pero no todo se centra en los juegos: un algoritmo reciente parece ser capaz de diagnosticar un fallo cardíaco por medio de imágenes de resonancia magnética con tanta pericia como un cardiólogo.

Yoshua Bengio es catedrático de ciencias de la computación de la Universidad de Montreal y uno de los padres de la técnica de aprendizaje profundo.



INTELIGENCIA, CONOCIMIENTO Y APRENDIZAJE

¿Por qué se topó la IA con tantas barreras en las décadas previas? La razón reside en que la mayor parte del conocimiento que poseemos acerca del mundo no se encuentra formalizado en un lenguaje escrito mediante una secuencia de tareas explícitas, algo imprescindible para cualquier programa informático. Eso impide programar directamente un ordenador para que ejecute muchas de las acciones que los seres humanos realizamos con facilidad, como captar el significado de una frase, reconocer una imagen o conducir un coche. Los intentos para lograrlo —organizando conjuntos de hechos en pormenorizadas bases de datos, con el objeto de dotar a los ordenadores de un «facsímil» de la inteligencia— han tenido escaso éxito.

Es aquí donde interviene el aprendizaje profundo. Esta técnica forma parte de una disciplina de IA más amplia, el aprendizaje automático (*machine learning*), el cual se basa en los principios empleados para entrenar sistemas informáticos con la meta final de que las máquinas se instruyan a sí mismas. Uno de tales principios guarda relación con lo que un ser humano o un ordenador considera una «buena» decisión. En el caso de los animales, los principios evolutivos dictan que la respuesta a cada situación debe llevar a comportamientos que maximicen las opciones de supervivencia y de reproducción. En las sociedades humanas, puede ocurrir que una buena decisión haya de tener presente qué interacciones sociales reportan un cierto estatus o una sensación de bienestar. Sin embargo, cuando se trata de una máquina, como un coche sin conductor, la bondad de la decisión dependerá de la exactitud con que el vehículo autónomo imite el proceder de un conductor humano competente.

No tiene por qué resultar obvio cómo plasmar en un código informático los conocimientos necesarios para tomar una buena decisión en un determinado contexto. Un ratón, por ejemplo, posee un conocimiento de su entorno y un sentido innato que le permiten saber dónde olisquear y cómo mover las patas, hallar comida o pareja y evitar los depredadores. Ningún programador sería capaz de especificar un conjunto detallado de instrucciones para reproducir, paso a paso, semejante comportamiento. Sin embargo, tales conocimientos se encuentran codificados de alguna manera en el cerebro del roedor.

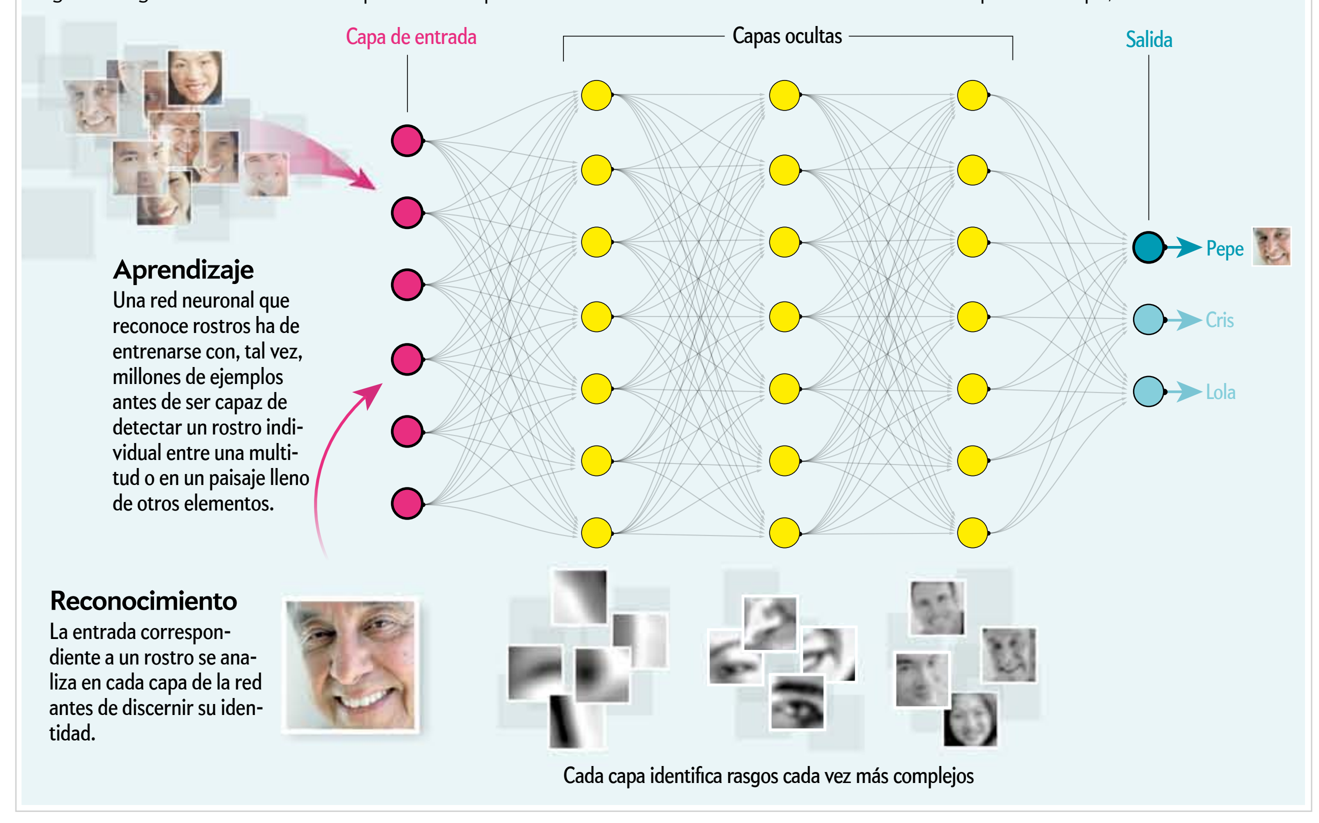
Antes de crear sistemas autodidactas, los científicos computacionales debían aclarar una cuestión fundamental: ¿cómo adquirimos conocimientos los seres humanos? Algunos son innatos, pero la mayoría proviene de la experiencia. Lo que sabemos por intuición no puede traducirse en una secuencia definida de pasos apta para ser ejecutada por un ordenador, pero a menudo puede aprenderse a partir de ejemplos y de la práctica. Desde los años cincuenta, los investigadores han estado buscando y procurando depurar los principios generales que confieren a los animales y a los seres humanos —y, si vamos al caso, a las máquinas— la capacidad de adquirir conocimientos gracias a la experiencia. El aprendizaje automático aspira a establecer procedimientos, llamados algoritmos de aprendizaje, que permitan a una máquina aprender de los ejemplos que se le presenten.

La ciencia del aprendizaje automático es en gran medida experimental, puesto que no existe un algoritmo universal de

Redes inteligentes que cada vez lo son más

Las conexiones entre neuronas colindantes dentro de la corteza cerebral han inspirado la creación de algoritmos que tratan de imitar estos intrincados enlaces. Se puede enseñar a una red neuronal a reconocer un rostro entrenándola con un número muy grande de imágenes. Una vez que ha «aprendido» a establecer la categoría de cara (distinguiéndola, por ejemplo, de la de mano) y a detectar rostros individuales, la red utiliza ese conocimiento para identificar caras que ha visto antes aunque la imagen sea ligeramente distinta de aquella con la que se entrenó.

Para realizar un reconocimiento facial, la red neuronal analiza primero los píxeles individuales de la imagen que se le presenta en la capa de entrada. A continuación, en el estrato siguiente, selecciona formas geométricas distintivas de un rostro concreto. Al ascender en la jerarquía, una capa intermedia detecta los ojos, la boca y otras facciones para que, en un nivel superior, pueda discernirse un rostro completo compuesto por esos elementos. En la capa de salida, la red hace una «suposición» acerca de si la cara corresponde a Pepe, Cris o Lola.



aprendizaje: no hay ninguno que posibilite que un ordenador aprenda bien todas las tareas que se le asignen. Todo algoritmo de adquisición de conocimientos ha de ser ensayado en tareas de aprendizaje con datos específicos de la situación de que se trate, ya sea reconocer una puesta de sol o traducir del inglés al urdu. No hay modo de demostrar que, cualquiera que sea la situación, un algoritmo dado lo hará siempre mejor que el resto.

Existe una descripción matemática formal de este principio: el teorema de «todo cuesta algo» (*no free lunch*), el cual demuestra que no existe ningún algoritmo capaz de abordar todas las situaciones de aprendizaje del mundo real. Sin embargo, el comportamiento humano parece contradecir esta afirmación: se diría que poseemos facultades cognitivas bastante generales que nos permiten dominar una multitud de actividades para las que la evolución no preparó a nuestros ancestros, como jugar al ajedrez, construir puentes o investigar en IA.

Esa capacidad de aprendizaje sugiere que la inteligencia humana explota suposiciones generales sobre el mundo, las cuales podrían servir de inspiración para crear máquinas dotadas de algún tipo de inteligencia general. Por esta razón, los expertos en redes neuronales artificiales han elegido el cerebro como modelo aproximado para diseñar sistemas inteligentes.

Las unidades principales de computación en el cerebro son las neuronas, las cuales se comunican entre sí a través de los pequeños huecos que hay entre ellas, las hendiduras sinápticas. Para referirse a la propensión de una neurona a enviar una señal a través de ese espacio —y a la amplitud de dicha señal— se emplea la expresión «fuerza sináptica». Conforme una neurona «aprende», su fuerza sináptica aumenta y, por tanto, también es más probable que, una vez estimulada por un impulso eléctrico, transmita mensajes a sus vecinas.

La neurociencia espoleó la aparición de redes artificiales que imitaban las neuronas mediante programas informáticos o sistemas físicos. Las primeras investigaciones en esta área de la IA, conocida como «conexionismo», partían del supuesto de que las redes neuronales serían capaces de aprender tareas complejas a partir de la alteración gradual sus conexiones mutuas, de manera que las pautas de actividad neuronal captasen el contenido de una entrada determinada, como una imagen o un fragmento de diálogo. A medida que las redes recibieran más

PUNCHSTOCK (*caras*); JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*)

ejemplos, el aprendizaje proseguiría mediante la modificación de las fuerzas sinápticas entre las neuronas, lo que derivaría en representaciones cada vez más exactas de, digamos, las imágenes de una puesta de sol.

LECCIONES SOBRE PUESTAS DE SOL

La redes neuronales modernas amplían el trabajo pionero del conexionismo. Van cambiando gradualmente ciertos valores numéricos asociados a cada conexión sináptica, los cuales representan su fuerza y, por tanto, la probabilidad de que la neurona transmita una señal. Los algoritmos empleados en las redes de aprendizaje profundo corrigen muy poco a poco estos parámetros cada vez que se observa una imagen nueva, y los aproximan constantemente a los que permiten realizar mejores predicciones sobre el contenido de la imagen.

Para mejorar los resultados, los algoritmos de aprendizaje actuales requieren una estrecha implicación humana. La mayoría se valen de métodos de aprendizaje supervisado, en los que cada ejemplo usado en el entrenamiento se acompaña de una etiqueta, elaborada por seres humanos, que indica lo que se pretende enseñar: una foto de un atardecer, digamos, se asociará con la leyenda «puesta de sol». En este caso, el objetivo del algoritmo consiste en tomar una fotografía como entrada y producir, como salida, el nombre del objeto característico de la imagen. El proceso matemático que transforma una entrada en una salida se llama función, y los valores numéricos (como las fuerzas sinápticas) que la generan corresponden a una solución de la tarea de aprendizaje.

Aprender de memoria las respuestas correctas sería fácil pero un tanto inútil. Queremos enseñar al algoritmo qué es una puesta de sol, pero de tal modo que luego sea capaz de reconocerla en cualquier imagen, aunque no la haya visto antes. El objetivo principal de un algoritmo de aprendizaje automático consistiría, en este caso, en ser capaz de reconocer cualquier puesta de sol; en otras palabras, en generalizar el aprendizaje más allá de los casos concretos. De hecho, la calidad del entrenamiento de una red se evalúa poniéndola a prueba con colecciones de datos no vistos con anterioridad. La dificultad de clasificar correctamente un nuevo ejemplo nace de las casi infinitas variaciones posibles que siguen perteneciendo a una determinada categoría, como la etiquetada como «puesta de sol».

Para conseguir esta generalización a partir de la observación de múltiples ejemplos, los algoritmos necesitan algo más que los ejemplos mismos. También han de apoyarse en ciertas hipótesis sobre la información introducida y en premisas acerca de en qué puede consistir la solución a un problema dado. Una hipótesis típica incorporada a un programa podría ser la que enunciase que, si los datos de entrada de una función son similares, las respuestas no podrán cambiar demasiado; es decir, que, en condiciones normales, alterar unos pocos píxeles en una fotografía de un gato no transformará al felino en un perro.

Entre las redes neuronales que integran hipótesis acerca de las imágenes están las llamadas «redes convolucionales». A ellas se debe, en buena parte, el renovado interés por la IA. Las redes neuronales convolucionales usadas en el aprendizaje profundo constan de muchas capas de neuronas, organizadas de manera que generen una respuesta menos sensible al objeto principal cuando se altera la imagen; por ejemplo, si se cambia ligeramente su posición. Una red bien entrenada debe ser capaz de identificar un mismo rostro visto desde ángulos diferentes en fotografías distintas. El diseño de una red convolucional se inspira en la estructura multicapa de la corteza visual, la región del cerebro que recibe estímulos desde los ojos. Los numerosos estratos de neuronas virtuales que componen una red convolucional son los que la hacen «profunda» y los que le confieren, por tanto, una mayor capacidad de aprender sobre el mundo.

CAPAS PROFUNDAS

En la práctica, los avances que posibilitaron el aprendizaje profundo se debieron a innovaciones específicas surgidas hace unos diez años, cuando el interés en la IA y las redes neuronales había alcanzado su punto más bajo en decenios. El Instituto Canadiense de Investigaciones Avanzadas (CIFAR), una organización financiada por el Gobierno del país y por donantes privados, contribuyó a reavivar la llama al patrocinar un proyecto dirigido por Geoffrey Hinton, de la Universidad de Toronto, y en el que participaban Yann LeCun, de la Universidad de Nueva York, Andrew Ng, de Stanford, Bruno Olshausen, de la Universidad de California en Berkeley, y el autor de estas líneas, entre otros investigadores. Por entonces, la actitud hacia esta área de investigación era tan negativa que resultaba difícil publicar algo sobre ella e incluso convencer a estudiantes de doctorado para que trabajaran en el campo. Algunos, sin embargo, compartíamos la sensación de que era importante seguir intentándolo.

El retorno de las redes neuronales tras el largo invierno de la IA subraya la necesidad de respaldar ideas que desafíen el orden tecnológico establecido

El escepticismo de aquel entonces con respecto a las redes neuronales nacía, en parte, de que se pensaba que entrenarlas resultaba inútil por lo difícil que era optimizar su comportamiento. La optimización es una rama de las matemáticas que trata de encontrar la configuración adecuada de un conjunto de parámetros para lograr un objetivo. En este caso, los parámetros son los pesos sinápticos que representan la intensidad con que una señal se transmite de una neurona a otra.

El objetivo consiste en realizar predicciones con el mínimo número de errores. Cuando la relación entre los parámetros y un objetivo es simple —o, en términos más técnicos, cuando el objetivo es una función convexa de los parámetros—, estos se pueden ajustar progresivamente. El proceso se repite hasta que los parámetros convergen a los valores que producen la mejor elección posible, conocida como «mínimo global», la cual corresponde al error medio más bajo alcanzable.

Por norma general, sin embargo, el entrenamiento de una red neuronal no es tan sencillo y requiere lo que se denomina una optimización no convexa. Estos problemas presentan grandes dificultades, por lo que numerosos investigadores creían que el obstáculo era insalvable. El algoritmo de aprendizaje puede converger a un mínimo local (una «solución» que no es la mejor de todas) y quedarse atascado en él. Una vez allí, será incapaz

de disminuir el error de la predicción mediante un ligero ajuste de los parámetros

Hasta el año pasado no cayó el mito de que entrenar a una red neuronal resultaba difícil a causa de los mínimos locales. En nuestras investigaciones, descubrimos que este problema se reducía en gran medida si la red neuronal era lo suficientemente grande. En realidad, la mayoría de esos mínimos corresponden a haber adquirido un conocimiento de un nivel que casi iguala el valor óptimo del mínimo global.

Aunque los problemas teóricos de optimización podían resolverse así en teoría, a menudo se había fracasado en la construcción de grandes redes con más de dos o tres capas. Desde 2005, varios estudios financiados por el CIFAR han permitido superar esas barreras. En 2006 conseguimos entrenar redes neuronales más profundas aplicando una técnica que procedía capa a capa. Más tarde, en 2011, encontramos un método mejor para entrenar redes aún más profundas (con más niveles de neuronas virtuales), basado en modificar los cálculos efectuados por cada una de estas unidades de procesamiento para que se parecieran más a la manera de proceder de las neuronas biológicas. También descubrimos que, de manera similar a lo que ocurre en el cerebro, la introducción de ruido aleatorio en las señales transmitidas entre las neuronas durante el entrenamiento aumentaba su capacidad de aprender a reconocer una imagen o un sonido.

Dos factores clave contribuyeron al éxito del aprendizaje profundo. Por un lado, la velocidad de cómputo se decuplicó de golpe gracias a unidades de procesamiento gráfico diseñadas inicialmente para los videojuegos, lo que permitió entrenar a redes de gran tamaño en tiempos razonables. Por otro, los algoritmos se beneficiaron de la disponibilidad de enormes conjuntos de datos etiquetados, para los cuales era posible encontrar la respuesta correcta («gato», por ejemplo, al inspeccionar una fotografía en la que un gato es solo uno de los componentes).

Otra razón del éxito del aprendizaje profundo radica en su facultad para aprender a ejecutar una secuencia de cálculos que construyen o analizan, paso a paso, una imagen, un sonido o cualquier otro tipo de dato. La profundidad de la red corresponde al número de pasos. Para muchas de las tareas de reconocimiento visual o auditivo en las que sobresale la IA, se requieren las numerosas capas de las redes profundas. De hecho, en varios estudios experimentales y teóricos recientes, hemos demostrado que algunas de estas operaciones matemáticas no podrían llevarse a cabo de manera eficiente si las redes no tuviesen la suficiente profundidad.

Cada capa de una red neuronal profunda transforma la entrada que recibe y genera una salida que se envía a la capa siguiente. La red representa conceptos más abstractos en los estratos más profundos, los más alejados de la entrada sensorial inicial. Los experimentos muestran que las neuronas artificiales de los niveles más profundos de la red tienden a corresponderse con conceptos semánticos más abstractos. Considere un objeto visual, como un escritorio. El reconocimiento de la imagen del escritorio podría surgir del procesamiento de las neuronas en un estrato profundo, aun cuando la palabra «escritorio» no formara parte de las etiquetas de categoría usadas en el entrenamiento de la red. Y esto podría ser solo un paso intermedio hacia la creación, en un nivel superior, de un concepto aún más abstracto, como el de «escena de oficina».

MÁS ALLÁ DEL RECONOCIMIENTO DE PATRONES

Hasta hace poco, las redes neuronales artificiales se distinguían en gran medida por su capacidad para llevar a cabo tareas como el reconocimiento de patrones en imágenes estáticas. Sin embargo, otra clase de red neuronal está dejando también su impronta, especialmente por sus aplicaciones a sucesos que se extienden en el tiempo. Las redes neuronales recurrentes han demostrado su capacidad para efectuar correctamente secuencias de cálculos relacionados con datos de voz o de vídeo, entre otros. Dichos datos se componen de una serie de unidades —ya sean fonemas o palabras completas— que se suceden en el tiempo. El procedimiento por el cual las redes recurrentes procesan sus entradas guarda cierta semejanza con la forma de trabajar del cerebro. Las señales que circulan entre las neuronas varían constantemente a medida que se analizan los estímulos percibidos por los sentidos. Este estado neuronal interno se modifica según la información más reciente suministrada al cerebro desde el entorno, antes de emitir una serie de órdenes que resultan en unos movimientos corporales dirigidos a conseguir una meta concreta.

Las redes recurrentes pueden predecir cuál será la siguiente palabra de una frase hablada o escrita, lo que también permite generar nuevas secuencias de palabras, una a una. También pueden afrontar tareas más complejas. Tras «leer» todas las palabras de una frase, la red puede deducir el significado de la oración completa. Una red recurrente distinta puede valerse entonces del procesamiento semántico de la primera para traducir la frase a otro idioma.

La investigación en redes neuronales recurrentes vivió su propio período de abandono a finales del siglo XX y principios del XXI. Mi trabajo teórico indicaba que podrían tropezar con dificultades a la hora de aprender a recuperar datos del pasado distante (los primeros elementos de la secuencia que se estuviese procesando), como cuando intentamos recitar las primeras frases de un libro después de haber llegado al final. Sin embargo, diversos avances han paliado algunos de estos problemas al dotar a estas redes de la capacidad de aprender a almacenar información para que persista durante un período prolongado. Las redes neuronales pueden usar la memoria temporal de un ordenador para procesar múltiples fragmentos dispersos de información, como las ideas contenidas en diferentes frases esparcidas a lo largo de un documento.

El retorno de las redes neuronales profundas tras el largo invierno de la IA no solo supone un triunfo tecnológico, sino que también nos proporciona una lección sobre la sociología de la ciencia. En particular, subraya la necesidad de respaldar ideas que desafían el orden tecnológico establecido y la de alentar una cartera de investigaciones variada que apueste por disciplinas que hayan perdido popularidad temporalmente. IyC

PARA SABER MÁS

ImageNet classification with deep convolutional neural networks. Alex Krizhevsky et al. Presentado en *26th Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2012)*, Stateline, Nevada (EE.UU.), 3-8 de diciembre de 2012.

Representation learning: A review and new perspectives. Y. Bengio et al. en *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 35, n.º 8, págs. 1798-1828, agosto de 2013.

Deep learning. Yann LeCun et al. en *Nature*, vol. 521, págs. 436-444, mayo de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Técnicas de aprendizaje automatizado. Y. S. Abu-Mostafa en *IyC*, abril de 2013.

Máquinas capaces de aprender. Nicola Jones en *MyC* n.º 70, 2015.

INFORME ESPECIAL
LA EDAD DE ORO DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

MODELOS COGNITIVOS

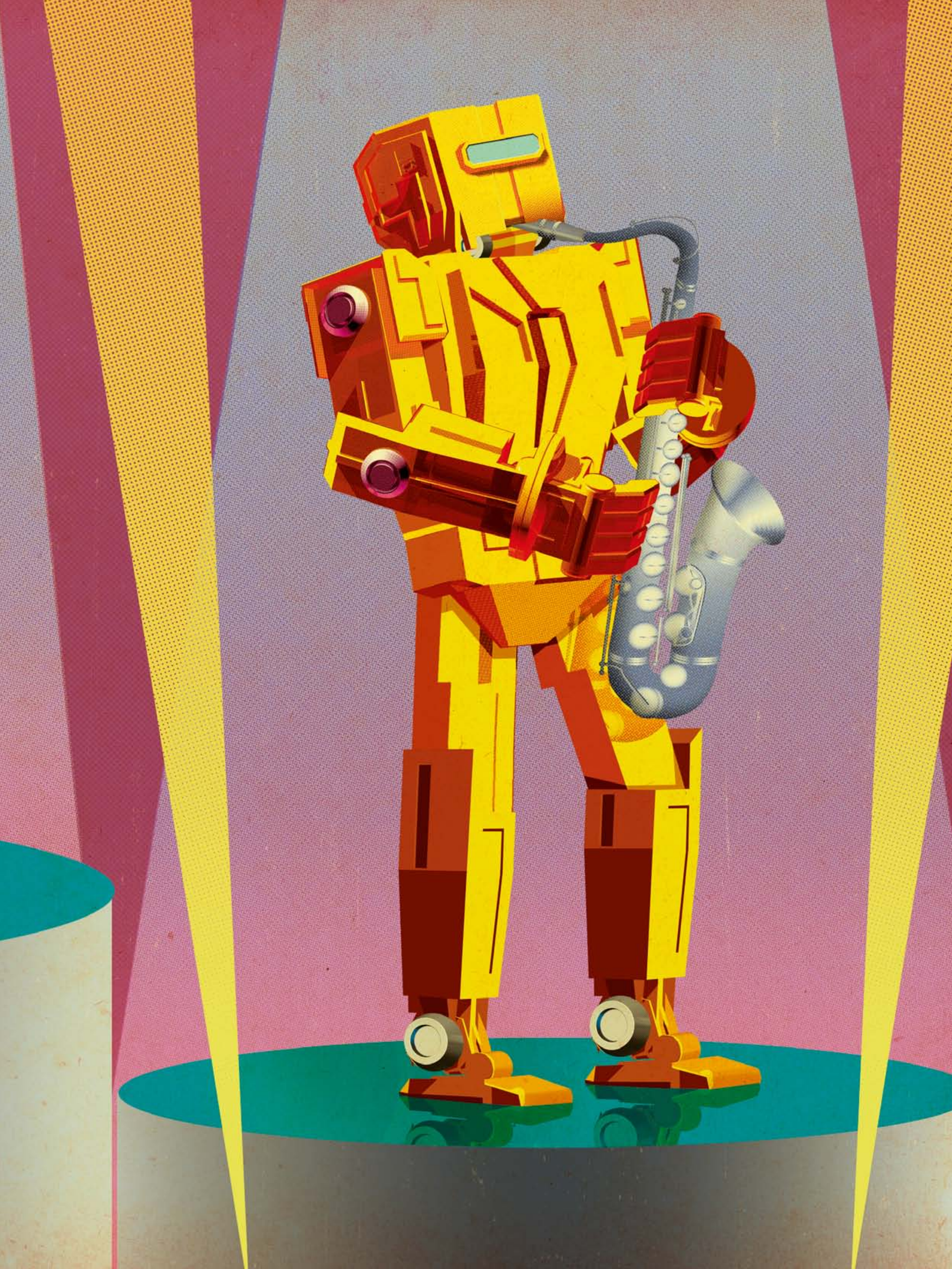
EL VALOR DE LA EXPERIENCIA PARA LOS ROBOTS

Las máquinas pueden aprender a partir de vivencias pasadas. El método, conocido como razonamiento basado en casos, se ha aplicado con éxito en el diagnóstico médico, el fútbol robótico o la interpretación musical

Ramon López de Mántaras



TAVIS COBURN, MODIFICADO POR *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*



Ramon López de Mántaras es director del Instituto de Investigación en Inteligencia Artificial del CSIC, en Barcelona. Ha destacado por sus trabajos en reconocimiento de patrones y razonamiento basado en casos, entre otras áreas.





N SUS INICIOS, LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA) TENÍA COMO objetivo emular la capacidad de la mente humana para procesar información de manera simbólica. Eso hizo que se prestase especial atención a la «plausibilidad cognitiva» de los distintos modelos computacionales; es decir, a su posible analogía con los procedimientos usados por los seres humanos durante el aprendizaje y la resolución de problemas.

Desde hace unos años, sin embargo, el acceso a enormes cantidades de datos y la posibilidad de procesarlos con eficiencia han derivado en un uso extensivo de técnicas estadísticas. Así ocurre, por ejemplo, con algunos métodos de aprendizaje profundo, los cuales requieren un entrenamiento con cientos de miles o incluso millones de datos para que la máquina aprenda un modelo de un concepto y, más tarde, pueda reconocer otros casos pertenecientes a dicho concepto [*véase* «Aprendizaje profundo», por Yoshua Bengio, *en este mismo número*]. No obstante, los seres humanos no aprendemos de ese modo. Lo hacemos a partir de muy pocos ejemplos y, en ocasiones, incluso de uno solo.

El razonamiento basado en casos (CBR, por sus siglas en inglés) es una técnica de IA que, a diferencia de otras, se apoya en el papel que desempeña la memoria en la resolución de problemas. Los nuevos problemas se afrontan mediante la reutilización —y, si es necesario, la adaptación— de soluciones a problemas semejantes ya resueltos en el pasado. Su hipótesis fundamental es que problemas similares tienen soluciones similares; un hecho que ha sido validado empíricamente en numerosos ámbitos del mundo real. En particular, el CBR no necesita millones de ejemplos para asimilar un concepto. Ello se debe a que la máquina no aprende un modelo general, sino que, sobre la base de unos pocos ejemplos almacenados en su memoria, es capaz de reconocer casos similares no vistos anteriormente. Desde este punto de vista, el CBR resulta más plausible cognitivamente que las técnicas basadas en cálculos estadísticos intensivos.

Buena parte de la inspiración para el estudio del CBR procede de las investigaciones sobre la memoria humana llevadas a cabo a principios de los años ochenta por Roger Schank, por entonces profesor de psicología y teoría de la computación en Yale. Tales trabajos se enmarcaban en el ámbito de las ciencias cognitivas, un área que presta especial atención al papel de la memoria como recurso fundamental para resolver problemas mediante

EN SÍNTESIS

El razonamiento basado en casos (CBR) es una técnica de inteligencia artificial basada en el papel que desempeña la memoria en el aprendizaje. Las nuevas tareas se afrontan examinando casos similares resueltos en el pasado.

A diferencia de los métodos basados en análisis estadísticos, el CBR se inspira en los procesos cognitivos que tienen lugar en la mente humana. Entre otras ventajas, eso permite que el sistema pueda justificar sus decisiones ante el usuario.

El CBR se ha aplicado con gran éxito en multitud áreas. En los últimos años, dos ámbitos que han ejercido una repercusión especial en investigación básica han sido el fútbol robótico y la síntesis expresiva de música.

JORDI LARGO (*fotografía original del autor*)

el razonamiento y, en particular, mediante el razonamiento por analogía. Más tarde, a partir de los años noventa, comenzó a verse que este enfoque resultaba de gran utilidad en una amplia variedad de aplicaciones. Desde entonces el CBR se ha usado con notable éxito en todo tipo de tareas y dominios; entre ellos, el diagnóstico médico —ya que síntomas, antecedentes clínicos y analíticas similares suelen conducir a diagnósticos parecidos—, la toma de decisiones en asuntos legales (sobre todo en situaciones donde tales resoluciones se basan en la jurisprudencia), la robótica y, también, la interpretación expresiva de música, una actividad que, a priori, todos asociaríamos con facultades cognitivas exclusivas del ser humano.

La resolución de un problema mediante CBR consta de varios pasos. En primer lugar, hemos de describir la tarea que queremos resolver con un lenguaje interpretable por un ordenador y calcular su similitud con problemas anteriores. Estos se encuentran almacenados, junto con sus respectivas soluciones, en una «base de casos». Después se recuperan uno o más casos parecidos y se intenta reutilizar la solución de uno de ellos, a menudo adaptada para tener en cuenta las diferencias entre el problema original y el memorizado. La solución propuesta por el sistema debe entonces ser evaluada —por ejemplo, aplicándola al problema inicial o sometiéndola al juicio de un experto— y, en función del resultado, revisada. Por último, tanto el problema como su solución se añaden a la base de casos; es decir, se retienen en la memoria. De esta manera, podemos decir que el sistema ha aprendido a resolver un nuevo problema. Las cuatro etapas fundamentales de este ciclo son conocidas como «las 4 R»: recuperar, reutilizar, revisar y retener.

Los sistemas más avanzados de CBR presentan un análisis que incluye casos a favor y en contra. En definitiva, no se trata únicamente de proponer soluciones, sino de poder apoyarlas con argumentos

CASOS SIMILARES

La recuperación de los casos precedentes más apropiados y, por consiguiente, el cálculo de la similitud entre las descripciones de los problemas resulta clave para el correcto funcionamiento de todo sistema de CBR. Por este motivo, la mayor parte de las investigaciones se han centrado en esta etapa.

En la mayoría de las aplicaciones, la selección de los precedentes se basa en calcular una «función de similitud» entre las distintas variables, también llamadas atributos, que describen los casos anteriores y las asociadas al nuevo problema. En una aplicación médica, por ejemplo, tales atributos podrían ser la presión sanguínea, la frecuencia cardíaca y la temperatura axilar. Para cada uno de los casos almacenados en la memoria, se determinarían las similitudes entre los atributos individuales calculando, por ejemplo, la distancia entre sus valores, y a continuación se evaluaría la semejanza global entre el caso precedente y el nuevo problema. Este paso requiere combinar de algún modo las similitudes entre los atributos individuales. Una manera de hacerlo puede consistir en calcular la media aritmética. Si algunos atributos revisten más importancia que otros, deberá asociarse un peso a cada uno de ellos para obtener una media ponderada. Una vez obtenida la función de similitud (la cual suele tomar valores entre 0 y 1), se selecciona el precedente más similar. Este algoritmo de recuperación pertenece a la familia de los denominados «algoritmos de vecino más próximo».

Sin embargo, puede ocurrir que la representación de los problemas no consista en una simple lista de atributos superficiales, sino en una representación estructurada, como un grafo. En tales situaciones, es necesario usar funciones de similitud mucho más complejas, como la «distancia de edición» (el número mínimo de cambios que hemos de efectuar para transformar una representación en otra) o funciones de detección de isomorfismos (equivalencias) entre grafos. Dichas funciones pueden ser mucho más costosas desde el punto de vista computacional, pero, al tratarse de representaciones más precisas y profundas tanto de los precedentes como de los nuevos problemas, los casos recuperados suelen resultar más adecuados que los obtenidos mediante una simple comparación de atributos superficiales. En medicina, una representación estructurada tendría en cuenta las relaciones de causa y efecto entre los atributos. Por ejemplo, se sabe que una presión sanguínea elevada en un ventrículo provoca dilatación cardíaca. Esta relación puede representarse con un grafo en el que uno de los nodos corresponde a la presión ventricular, otro a la dilatación cardíaca, y en el que ambos quedan conectados por un enlace dirigido. En un caso real, un grafo completo incluiría las múltiples relaciones existentes entre cientos o incluso miles de variables.

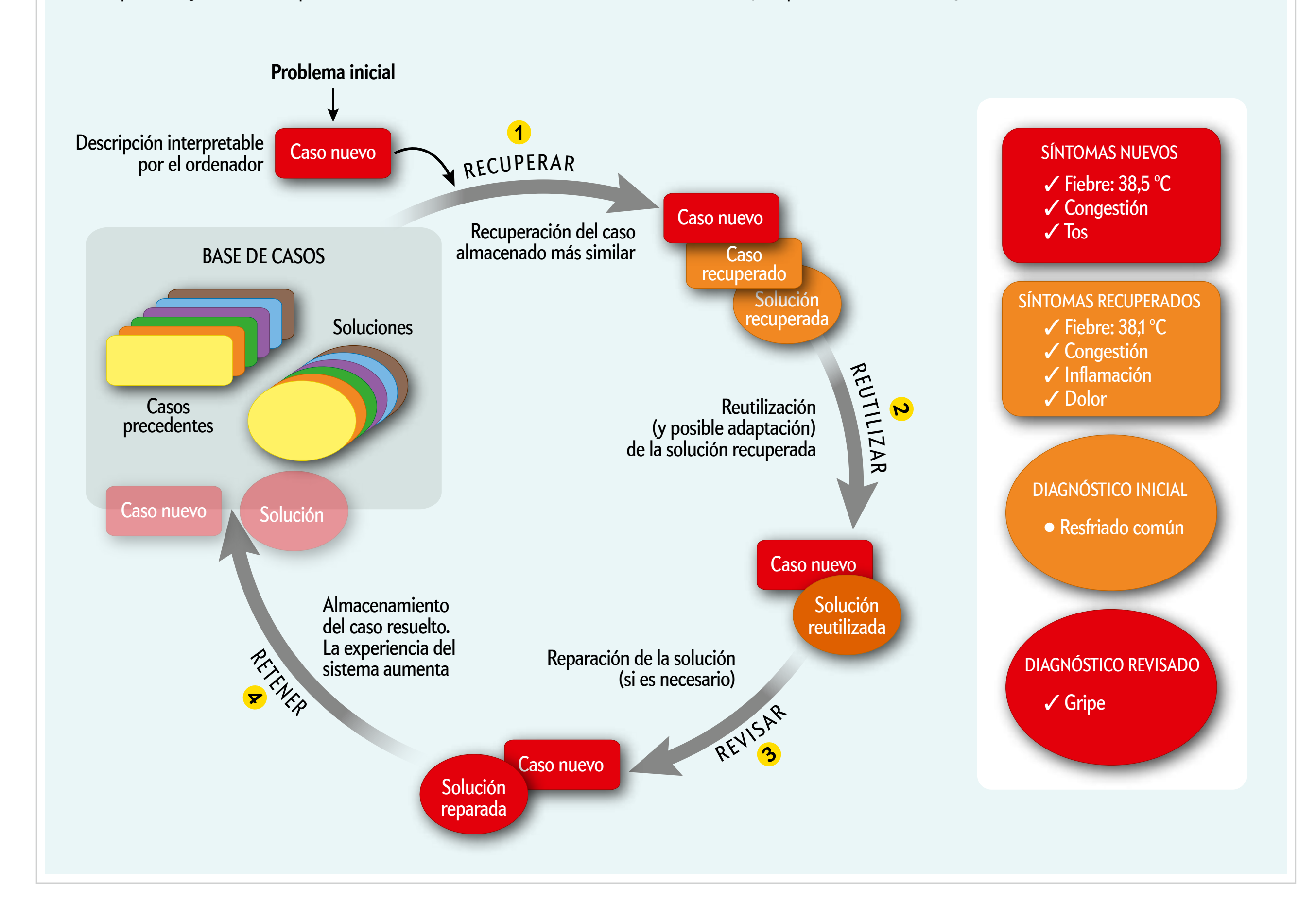
Pero el proceso de recuperación no tiene por qué limitarse a evaluar la similitud entre los casos precedentes y el nuevo problema. En ocasiones, puede ocurrir que la solución asociada al precedente más similar no sea la más fácil de adaptar al nuevo caso, por lo que no resultará útil. Para tener en cuenta este aspecto debe recurrirse a la «recuperación guiada por adaptación», la cual no solo tiene en cuenta el grado de similitud, sino también lo fácil que resultará adaptar la solución al nuevo problema. Esta combinación de medidas de similitud y de coste de adaptabilidad se ha empleado con éxito, por ejemplo, en el fútbol robótico.

En otras aplicaciones, como la recomendación de productos, una ventaja de la recuperación de precedentes basada en la similitud es que, si no existe ningún producto que satisfaga por completo los requerimientos del usuario, este puede recibir sugerencias de productos semejantes. Sin embargo, los precedentes más similares pueden a su vez parecerse mucho entre sí, por lo que el usuario acaba recibiendo recomendaciones muy poco diversas. Para evitar este problema, se han diseñado algoritmos de recuperación que combinan medidas de similitud y de diversidad, de modo que la selección de precedentes exhiba un compromiso razonable entre parecido y variedad.

Ver, recordar, aprender

El razonamiento basado en casos (CBR) es una técnica de inteligencia artificial que, a diferencia de aquellas basadas en un tratamiento estadístico intensivo de los datos, emula algunos de los procesos cognitivos que tienen lugar en la mente humana. En particular, se funda en el papel que desempeña la memoria en el proceso de resolución de problemas y en el hecho de que problemas similares suelen tener soluciones similares.

Los sistemas basados en CBR cuentan con una «base de casos», la cual incluye una colección de tareas ya resueltas en el pasado y sus correspondientes soluciones. Cuando se le asigna un nuevo problema, un algoritmo recupera el caso precedente más similar 1 y reutiliza su solución 2, a menudo adaptada para tener en cuenta las diferencias con el nuevo problema. Después, dicha solución es revisada 3, modificada si es necesario y, una vez considerada correcta, retenida en la base de casos 4. Este último paso enriquece la experiencia del sistema y mejora su capacidad para afrontar nuevos problemas en el futuro. El esquema reproducido aquí ilustra de manera simplificada las principales etapas de un ciclo de CBR, tomando como ejemplo un caso de diagnóstico médico.



Por último, otro factor que puede guiar la etapa de recuperación es la capacidad del sistema para justificar sus resultados. En IA es fundamental que el usuario pueda conocer los motivos que soportan las sugerencias a las que llegan los algoritmos. Las razones para ello son varias, pero un motivo es que, de esa manera, el usuario puede confiar en el sistema inteligente, sobre todo en aquellas aplicaciones donde las decisiones puedan implicar consecuencias de calado, como sucede en el diagnóstico médico. Otro ámbito en el que la posibilidad de dar explicaciones desempeña un papel clave es el jurídico, ya que los precedentes similares crean jurisprudencia, la cual debe usarse para justificar nuevas decisiones. Existen numerosos ejemplos de aplicaciones jurídicas basadas en el CBR. Uno de los sistemas más conocidos es HYPO, desarrollado por Kevin Ashley, de la Universidad de Pittsburgh, el cual ayuda a tomar decisiones legales sobre conflictos entre empresas relativos a posibles violaciones de secretos comerciales. Los sistemas más avanzados de CBR no limitan sus justificaciones a mostrar al usuario el caso precedente más similar, sino que lo complementan con un análisis más profundo que incluye casos a favor y en contra. Es decir, el sistema busca en su memoria contraejemplos que puedan invalidar una solución frente a otra. En definitiva, no se trata únicamente de proponer soluciones, sino de poder apoyarlas con argumentos. Por desgracia, algunas de las últimas tendencias en IA, como el aprendizaje profundo, no pueden justificar cómo llegan a las soluciones que proponen los algoritmos.

REUTILIZAR, REVISAR Y RETENER

Tras la etapa de recuperación, la reutilización de un caso puede consistir en poner en práctica su solución sin modificarla. Esta

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN EL AUTOR

situación suele darse en tareas de clasificación, cuyo objetivo consiste en determinar a qué clase pertenece el nuevo problema y, por tanto, parece razonable asignarle la clase del precedente más similar.

Sin embargo, otras tareas requieren adaptar la solución del caso más parecido antes de reutilizarla. Por ejemplo, si hemos de planificar un menú a partir de una base de casos de recetas, y uno de los platos es lasaña pero uno de los comensales es vegetariano, el sistema procederá a adaptar la receta sustituyendo, por ejemplo, la carne por espinacas. El método de adaptación basado en reemplazar elementos de la solución original es muy común en CBR. A menudo, dicha sustitución implica otros cambios. En nuestro ejemplo, el proceso de cocción de las espinacas será distinto del de la carne, por lo que el sistema deberá incorporar las modificaciones correspondientes en la receta final.

La etapa de revisión consiste en comprobar si la solución propuesta es correcta y, en caso de no serlo, proceder a su reparación. Para ello el sistema deberá poseer los conocimientos necesarios para enmendar la solución, los cuales pueden representarse en forma de reglas de reparación. También pueden buscarse otros casos precedentes que la completen. Consideremos un diagnóstico médico que sugiera que la válvula aórtica está calcificada. Si, en opinión de los médicos, ese dictamen aún no explica todos los síntomas del paciente, convendrá revisar la solución y buscar precedentes relevantes. Uno de ellos podría sugerir que tal vez la válvula mitral también se encuentre calcificada. Si dicha posibilidad explica mejor todos los síntomas, el diagnóstico inicial se revisaría para incluir ambas válvulas.

La última etapa del ciclo de resolución de problemas mediante CBR es la de retención, o memorización del nuevo caso y de su solución. Este paso no suele ser completamente automático, ya que por lo general es el usuario quien, una vez revisada la solución y considerada correcta, decide añadirla a la base de casos, enriqueciendo así la experiencia del sistema de cara a problemas futuros. Es importante señalar que numerosos sistemas de CBR comparan el nuevo caso con los ya existentes para detectar posibles redundancias. Si existe algún precedente con características muy similares, se le mostraría al usuario para que considere la conveniencia de retenerlo. La razón para querer almacenar casos muy similares puede ser que haya muy pocas diferencias pero que estas sean muy significativas. Si eso ocurre, el usuario procedería a incluir el nuevo problema y su solución en la base de casos y lo indexaría según la diferencia observada, con el fin de facilitar su futura recuperación. De esta manera se cierra por completo el ciclo de resolución de problemas con CBR.

INTELIGENCIA MUSICAL

A continuación describiremos dos áreas de aplicación del CBR especialmente interesantes por la gran complejidad que presentan: la música y el fútbol robótico. Estudiadas durante la primera década de este siglo, ambas plantearon importantes desafíos al CBR y contribuyeron a perfeccionar varios aspectos de esta técnica.

En el caso de la interpretación musical, su principal atractivo radica en la dificultad que entraña representar los casos precedentes; es decir, las piezas musicales. La primera aplicación del CBR a este ámbito fue presentada en 1998 por Josep Lluís Arcos, del Instituto de Investigación en Inteligencia Artificial (IIIA) de Barcelona; Xavier Serra, de la Universidad Pompeu Fabra, y el autor de este artículo, y fue desarrollada en varios aspectos durante los años posteriores. Nuestro sistema, denominado SaxEx, es capaz de interpretar baladas de jazz de una alta calidad expresiva a partir de una base de casos formada por interpretaciones humanas del mismo estilo musical. Gracias a los ejemplos almacenados en su memoria y ayudado por las partituras, las cuales también se le proporcionan al sistema, SaxEx puede convertir una entrada no expresiva en una interpretación que sí lo es (alegre o triste, por ejemplo). La expresividad musical constituye un campo de estudio de gran importancia tanto en musicología como en informática musical. En el pasado, los sistemas basados en reglas para modelizar la expresividad contemplaban únicamente dos parámetros, la dinámica y el *rubato*, ya que resulta muy difícil encontrar reglas que capturen la variedad que caracteriza a las interpretaciones expresivas. Además, los diferentes parámetros interactúan unos con otros, lo que complica aún más la identificación de reglas.
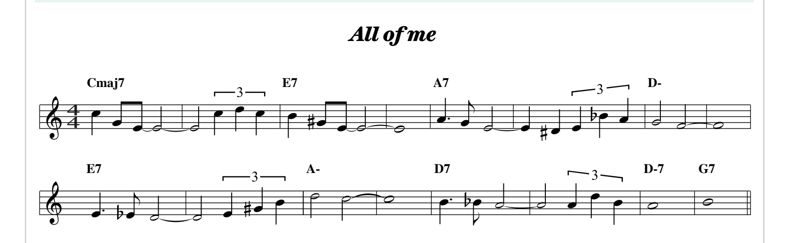
APLICACIONES

Tócala otra vez

El razonamiento basado en casos se ha aplicado con éxito en todo tipo de dominios, desde el diagnóstico médico y la jurisprudencia hasta el fútbol robótico o la interpretación musical. Este último ámbito ha dado lugar a importantes avances debido a la gran dificultad que entraña representar los casos (piezas musicales) en un lenguaje interpretable por un ordenador.

SaxEx, un sistema pionero desarrollado por investigadores del Instituto de Investigación en Inteligencia Artificial (IIIA) de Barcelona, es capaz de generar interpretaciones expresivas de baladas de jazz (alegres o tristes, por ejemplo) a partir de una entrada carente de expresión (*esquema*). Para ello, el sistema emplea una base de casos que incluye interpretaciones humanas del mismo estilo musical. Tras recuperar las más pertinentes y analizarlas, SaxEx deduce qué rasgos interpretativos debe emplear para conferir expresión a la pieza propuesta.

All of me



Uno de los aspectos más interesantes de SaxEx reside en que el sistema consigue aprovechar los conocimientos de un intérprete humano que se hallan implícitos en sus interpretaciones musicales, sin necesidad de hacerlos explícitos por medio de reglas. La página web del autor incluye enlaces a varios ejemplos de audio de interpretaciones expresivas ejecutadas por SaxEx: www.iiia.csic.es/~mantaras

SaxEx ha demostrado que es posible aplicar el CBR para incorporar cinco parámetros: dinámica, *rubato*, *vibrato*, articulación y ataque de las notas. Para ello, el sistema analiza previamente las interpretaciones humanas alojadas en su memoria mediante técnicas espectrales, las cuales permiten obtener una descripción simbólica de los niveles dinámicos de las notas y de su duración, así como del *vibrato*, articulación y tipo de ataque. Además, SaxEx incorpora conocimientos musicales; en concreto, una modelización parcial de la teoría generativa de música tonal desarrollada en los años ochenta del siglo pasado por Fred Lehrdal, musicólogo de la Universidad de Columbia, y Ray Jackendoff, lingüista de la Universidad Tufts. Dichos conocimientos son necesarios para analizar las partituras, determinar qué función desempeña cada nota en la frase musical a la que pertenece y, de esta forma, recuperar de la base de casos aquellas notas expresivas más similares a las de la frase musical de entrada. Una vez seleccionadas, SaxEx procede a transferir sus valores expresivos a las notas que deben sintetizarse.

La representación de casos en SaxEx es estructurada y compleja, lo que requirió desarrollar un nuevo lenguaje de representación y un algoritmo de recuperación propio. Este último se basa en la noción de «perspectiva»: en ella, los casos y sus similitudes se representan mediante términos que pueden ser vistos como grafos dirigidos no cíclicos, y el algoritmo de recuperación proporciona una relación de orden que permite seleccionar el precedente más similar (en este caso, las notas expresivas más semejantes). Se trata de un claro ejemplo en el que la aplicación a un dominio antes inexplorado obliga a desarrollar nuevas técnicas.

Aunque limitados a interpretaciones monofónicas, los resultados obtenidos con SaxEx son muy convincentes y demuestran que el CBR constituye una técnica muy poderosa de resolución de problemas. Una de sus principales ventajas reside en que el sistema puede aprovechar directamente los conocimientos de un intérprete humano implícitos en sus interpretaciones musicales, pero sin necesidad de hacerlos explícitos por medio de reglas.

Sobre la base de los resultados de SaxEx, nuestro grupo de investigación desarrolló posteriormente TempoExpress, un sistema que logra modificar el tempo de una pieza musical sin alterar su expresividad. El problema reside en que no basta con reducir de manera uniforme la duración de todas las notas, ya que la expresividad es un recurso para enfatizar la estructura musical de la melodía y su afectividad, y tanto una como otra dependen del tempo. TempoExpress tiene en su base de casos un conjunto de interpretaciones expresivas a tempos distintos. Cuando recibe como entrada una interpretación a un tempo dado y el nuevo tempo de salida, recupera de la base de casos interpretaciones a tempos similares al de entrada y al de salida, analiza las diferencias entre ambas y se basa en ellas para generar la nueva interpretación.

Otras aplicaciones del CBR a la música expresiva han sido desarrolladas por Taizan Suzuki y sus colaboradores del Instituto de Tecnología de Tokio, así como por Asmir Tobudic y Gerhard Widmer, del Instituto Austríaco de Investigación en Inteligencia Artificial. La primera también recurre a una base de casos para generar múltiples interpretaciones expresivas de una pieza, si bien su análisis solo considera dos parámetros expresivos. Por su parte, el trabajo de Tobudic y Widmer reconoce los patrones de interpretación de un concertista de piano al nivel de las frases musicales y aprende a aplicarlos a ejecuciones nuevas.

FUTBOL ROBÓTICO

Uno de los grandes retos a los que se enfrenta la IA consiste en diseñar comportamientos coordinados y en tiempo real de robots móviles autónomos en entornos inciertos, dinámicos y adversos. En una serie de trabajos desarrollados en el IIIA a finales de la pasada década, aplicamos el CBR para seleccionar acciones cooperativas en un equipo de robots futbolistas a partir de un conjunto de jugadas almacenadas en la base de casos. El objetivo consiste en lograr pases coordinados entre los robots atacantes para superar la defensa del equipo rival. Los casos hacen una distinción explícita entre las características directamente controlables (la posición de los robos atacantes) y aquellas que no lo son (la posición de los robots rivales y del balón).

Nuestro sistema se basa en un algoritmo original de recuperación de casos que, además de evaluar la semejanza entre la situación del momento y las almacenadas en la base de casos, tiene también en cuenta el coste de adaptación que supone desplazar a los robots atacantes desde la posición en la que se encuentran hasta la sugerida por la jugada almacenada más similar. Nuestro sistema ha sido puesto a prueba tanto en simulaciones como con robots reales, en jugadas en las que intervienen dos robots atacantes contra dos defensas, o contra un defensa y un portero. Los resultados demuestran que es posible lograr un juego colaborativo y con pases bien planificados y ejecutados, superando con claridad a los métodos de juego que no planifican los pases.

Otros trabajos también han aplicado el CBR al fútbol robótico, tanto con robots reales como en la liga de robots simulados de la competición internacional RoboCup. Celebrada cada año, esta iniciativa tiene como objetivo último la creación de un equipo de robots autónomos humanoides que, en 2050, venza a la selección campeona del mundo: una predicción de Hiroaki Kitano, presidente de los laboratorios de investigación de Sony. En particular, la categoría de robots simulados (no físicos) permite centrarse en problemas más complejos, como aquellos relacionados con la toma de decisiones y otros aspectos de la IA, ya que no es necesario hacer frente al indeterminismo del mundo físico. Por ejemplo, resulta posible modelizar el comportamiento de los jugadores rivales. Varios trabajos han usado el CBR para aprender la manera en que juegan los robots oponentes, predecir sus movimientos y actuar en consecuencia. Un problema de este enfoque reside en que el modelo predictivo así obtenido resulta específico para cada equipo rival, por lo que el aprendizaje resulta poco útil una vez que se cambia de oponente.


PASES COORDINADOS: Diseñar robots autónomos capaces de reaccionar en entornos dinámicos constituye uno de los mayores retos a los que se enfrenta la inteligencia artificial. Estos robots AIBO de SONY han sido programados en el IIIA para jugar al fútbol. Gracias a un sistema basado en CBR, los robots aprenden a afrontar situaciones nuevas a partir de experiencias pasadas, logrando un juego colaborativo y pases bien planificados.

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL/CSIC

EL CBR DEL FUTURO

Los dos ámbitos que hemos descrito aquí revisten un interés particular para la investigación básica en CBR por cuanto la representación de los casos reviste gran complejidad, en el sentido de que no es posible limitarla a una lista de atributos y valores. En lo que respecta a la música, se necesita un nuevo tipo de representación estructurada, así como técnicas de recuperación basadas en conocimientos musicales. En el fútbol robótico, un entorno incierto y la presencia de agentes adversos plantean grandes retos para la recuperación y la reutilización de las soluciones. Este último paso resulta, además, especialmente complejo, ya que varios agentes tienen que coordinarse para resolver una tarea.

Hoy las aplicaciones del CBR abarcan casi todas las áreas posibles. De cara a futuros desarrollos, uno de los principales retos consistirá en aprovechar la gran cantidad de información no estructurada presente en Internet (texto libre, imágenes, sonido, etcétera). En general, nos gustaría acceder a toda esa experiencia para poder usarla como casos precedentes en nuevas aplicaciones. Sin embargo, un problema aún abierto es el de la representación y recuperación eficiente de información no estructurada.

Otro desafío reside en el mantenimiento de los casos contenidos en un sistema de CBR y, en particular, en la detección de redundancias y posibles incoherencias. La validez temporal de los casos también supone un problema, ya que la incorporación de un caso nuevo puede requerir eliminar otros que hayan quedado total o parcialmente obsoletos. Por último, también sería interesante automatizar la decisión de retener o no un nuevo caso; una etapa que, hoy por hoy, queda en manos del usuario. Para ello, el sistema debería analizar hasta qué punto resulta conveniente incorporar un nuevo caso a la memoria: ¿contribuirá a mejorar las prestaciones del sistema o, tal vez debido a su redundancia con los casos precedentes, sea mejor no retenerlo?

En definitiva, las principales líneas de investigación actual en CBR son el desarrollo de nuevos métodos para representar los casos y razonar a partir de información no estructurada, y el mantenimiento automático de los sistemas de CBR. Sin duda, los nuevos frentes que abra la resolución de estos problemas darán lugar a interesantes aplicaciones futuras.

PARA SABER MÁS

Dynamic memory: A theory of reminding and learning in computers and people. Roger C. Schank. Cambridge University Press, 1983.
SaxEx: A case-based reasoning system for generating expressive musical performances. Josep Lluís Arcos, Ramon López de Mántaras y Xavier Serra en *Journal of New Music Research*, vol. 27, n.º 3, págs. 194-210, 1998.
Retrieval, reuse, revise, and retention in case-based reasoning. Ramon López de Mántaras et al. en *The Knowledge Engineering Review*, vol. 20, n.º 3, págs. 215-240, septiembre de 2005.
A case-based approach for coordinated action selection in robot soccer. Raquel Ros et al. en *Artificial Intelligence Journal*, vol. 173, n.os 9-10, págs. 1014-1039, junio de 2009.
A concept drift-tolerant case-base editing technique. Ning Lu et al. en *Artificial Intelligence*, vol. 230, págs. 108-133, enero de 2016.
www.iiia.csic.es/~mantaras: Página web del autor. Incluye numerosos enlaces a varios aspectos de su trabajo, así como a ejemplos de audio de las interpretaciones musicales expresivas logradas por el sistema inteligente SaxEx.

EN NUESTRO ARCHIVO

Técnicas de aprendizaje automatizado. Yaser S. Abu-Mostafa en *IyC*, abril de 2013.
Abejas robóticas. Robert Wood, Radhika Nagpal Gu-Yeon Wei en *IyC*, mayo de 2013.



AUTOMOCIÓN

LA VERDAD SOBRE LOS COCHES SIN CONDUCTOR

Llegarán pronto, pero no serán como nos han hecho creer

Steven E. Shladover

* *

EN SÍNTESIS

La prensa y la industria del automóvil han exagerado las capacidades del coche automatizado. Todo encuentro en la carretera, por simple que sea, plantea enormes dificultades a los ordenadores. Los chóferes robóticos aún tardarán décadas en aparecer.

Los sistemas de conducción automatizada que dependen de la intervención humana en caso de emergencia son especialmente problemáticos. Aun así, en el próximo decenio veremos algunos sistemas de conducción autónoma, aunque restringidos a aplicaciones y condiciones específicas.

Algunas aplicaciones son viables y tal vez inevitables; entre ellas, los aparcacoches automáticos, las lanzaderas en recintos universitarios, las columnas de camiones pesados y los sistemas automáticos de control para carriles de autopista.



Steven E. Shladover es ingeniero mecánico y cofundador del programa Socios para la Tecnología Avanzada del Transporte (PATH), desarrollado por el Instituto de Estudios sobre el Transporte de la Universidad de California en Berkeley.



N UN FUTURO CERCANO, UN CHÓFER ELECTRÓNICO NOS LLEVARÁ A DONDE queramos ir, en el momento en que lo deseemos y con total seguridad... siempre y cuando no tengamos que girar a la izquierda a través del tráfico. Las cambiantes superficies de las carreteras también supondrán un problema, igual que la nieve y el hielo. Será de crucial importancia evitar a los agentes de tráfico, a los vigilantes de los cruces de peatones ante las escuelas y a los vehículos para emergencias. Además, en entornos urbanos, donde es probable que un peatón aparezca de repente frente al coche, quizá deberíamos ir a pie o en metro.

Estas simples situaciones con las que se topan a diario los conductores humanos plantean enormes problemas a los ordenadores. Su resolución requerirá tiempo, dinero y esfuerzo. Sin embargo, mucha gente está llegando a convencerse de que los vehículos completamente automatizados se hallan a la vuelta de la esquina.

¿Qué ha originado este malentendido? Parte del problema radica en la terminología. Los medios de comunicación aplican los descriptores «autónomo», «sin conductor» y «que se conduce a sí mismo» de forma indiscriminada a tecnologías que presentan importantes diferencias entre sí. Se han difuminado así unas distinciones clave. Además, la industria de la automoción no ha ayudado a aclarar las cosas. Los especialistas en mercadotecnia que trabajan para fabricantes de automóviles, proveedores de equipos y compañías tecnológicas se esmeran por componer materiales publicitarios que admitan un amplio abanico de interpretaciones del grado en que los respectivos productos automatizan la conducción. Y a los periodistas que cubren este campo les conviene adoptar las predicciones más optimistas, ya que estas se antojan más emocionantes. La consecuencia de este bucle retroalimentado es una espiral de expectativas cada vez menos realistas.

Esta confusión es desafortunada, porque la conducción automatizada, en efecto, está llegando. Pero no ocurrirá exactamente como nos están haciendo creer.

DEFINICIÓN DE CONDUCCIÓN AUTOMATIZADA

Conducir constituye una actividad mucho más compleja de lo que la mayoría de las personas aprecian. Implica un amplia variedad de habilidades y acciones, algunas de las cuales pueden automatizarse con mayor facilidad que otras. Mantener la velocidad en una carretera despejada resulta sencillo; esa es la razón de que los sistemas de control de velocidad ordinarios lleven decenios haciéndolo de manera automática. Conforme ha progresado la tecnología, los ingenieros han sido capaces de automatizar otras subtareas asociadas a la conducción. En la actualidad están muy difundidos los controles de velocidad adaptativos, que mantienen la velocidad y la distancia de seguridad con los vehículos que circulan por delante. Los asistentes de permanencia en el carril, como los incorporados en los nuevos modelos de Mercedes-Benz e Infiniti, se valen de cámaras, sensores y controles de dirección para mantener el vehículo centrado en el carril. Hoy los coches son ya bastante inteligentes, pero existe un enorme trecho entre estos sistemas y la conducción completamente automatizada.

La taxonomía en cinco niveles definida por SAE Internacional (antes llamada Sociedad de Ingenieros de Automoción) nos sirve para clarificar nuestra reflexión sobre la conducción autónoma. Los tres primeros peldaños de esta escala de automatización creciente (excluyendo el nivel cero, que corresponde a la automatización nula) están ocupados por tecnologías que precisan la intervención humana en caso de emergencia. El control de velocidad adaptativo, el asistente de permanencia en el carril y otros dispositivos similares pertenecen al nivel uno. Los sistemas de nivel dos combinan las funciones de las tecnologías ubicadas en el primer escalón (por ejemplo, los controles laterales y longitudinales de los sistemas de mantenimiento del carril y de control de velocidad adaptativo) para automatizar tareas de conducción más complejas. Es el grado máximo de automatización alcanzado en los vehículos que pueden adquirirse hoy en el mercado. Los sistemas de nivel tres permitirían a los conductores activar el piloto automático en situaciones concretas, como durante un atasco en una autopista.

Los dos escalones siguientes presentan profundas diferencias con los anteriores, ya que funcionan casi sin ayuda humana. Los sistemas de nivel cuatro (automatización elevada) se encargarían de todos los aspectos de la conducción dinámica, pero actuarían solo en situaciones definidas de forma muy estricta: por ejemplo, en un aparcamiento cerrado o en carriles de autopista reservados para vehículos de ese tipo. Por último, en la cima se

La escalera de la automatización

La industria del automóvil y los medios de comunicación han embarullado la terminología: las expresiones «autónomo», «sin conductor» y «autoconducido» oscurecen más que iluminan. Para aclarar las cosas, SAE Internacional ha elaborado definiciones, parafraseadas aquí, de los distintos niveles de automatización y los ha organizado en una escala según su dependencia decreciente del conductor. Esta jerarquía depara algunas sorpresas. Por ejemplo, el nivel cuatro es, en principio, más abordable que el tres. Los sistemas automatizados de nivel cinco —chóferes electrónicos que pueden gestionar cualquier situación sin necesidad de intervención humana— aún tardarán décadas en llegar.

	Un conductor humano vigila el entorno			El sistema vigila el entorno		
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
	Automatización nula	**Conducción asistida**	**Automatización parcial**	**Automatización condicional**	**Automatización elevada**	**Automatización plena**
	Ausencia total de dispositivos de ayuda a la conducción, como el control de velocidad adaptativo.	Sistemas que ayudan a mantener la velocidad o a permanecer en un carril, pero que dejan el control del vehículo al conductor.	La combinación de controles automáticos de velocidad y de dirección; por ejemplo, de mantenimiento del carril.	Sistemas automatizados que conducen y vigilan el entorno, pero con intervención humana en caso de emergencia.	Sistemas que realizan todas las tareas de conducción (aun en caso de emergencia), pero solo en circunstancias limitadas.	El verdadero chófer electrónico, con control total del vehículo en cualquier circunstancia y sin intervención humana en las emergencias.
Quién maneja el volante, acelera y frena	Conductor humano	Conductor humano y sistema	Sistema	Sistema	Sistema	Sistema
Quién vigila el entorno de conducción	Conductor humano	Conductor humano	Conductor humano	Sistema	Sistema	Sistema
Quién toma el control si surgen problemas	Conductor humano	Conductor humano	Conductor humano	Conductor humano	Sistema	Sistema
Número de tareas de conducción automatizadas	Ninguna	Algunas modalidades de conducción	Algunas modalidades de conducción	Algunas modalidades de conducción	Algunas modalidades de conducción	Todas las modalidades de conducción

FUENTE: SAE INTERNATIONAL (WWW.SAE.ORG/MISC/PDFS/AUTOMATED_DRIVING.PDF); PARA DOCUMENTACIÓN, INCLUIDAS LAS DEFINICIONES ORIGINALES COMPLETAS, VÉASE *TAXONOMY AND DEFINITIONS FOR TERMS RELATED TO ON-ROAD MOTOR VEHICLE AUTOMATED DRIVING SYSTEMS*. SAE INTERNATIONAL, ENERO 2014; NIGEL HOLMES (*iconos*)

halla el nivel cinco, el vehículo plenamente automatizado. Cabe suponer que esto es lo que se le viene a la cabeza a la mayoría de la gente cuando oye a alguien como Carlos Ghosn, director ejecutivo de Nissan, anunciar con absoluta confianza que, para el año 2020, habrá vehículos autónomos en las carreteras.

Lo cierto es que nadie espera que los sistemas automáticos de nivel cinco estén en el mercado para entonces. Y puede que los sistemas de nivel tres se demoren tanto como los de nivel cinco. Pero ¿qué ocurre con el nivel cuatro? Lo tendremos el próximo decenio. Para poder comprender este confuso estado de las cosas, tenemos que hablar de informática.

PESADILLA INFORMÁTICA

A pesar de la percepción popular, la capacidad de los conductores humanos para evitar colisiones graves resulta notable. Según las estadísticas de tráfico de Estados Unidos para 2011, se produce un accidente mortal cada 3,3 millones de horas de conducción y un accidente con heridos cada 64.000 horas. Estas cifras fijan

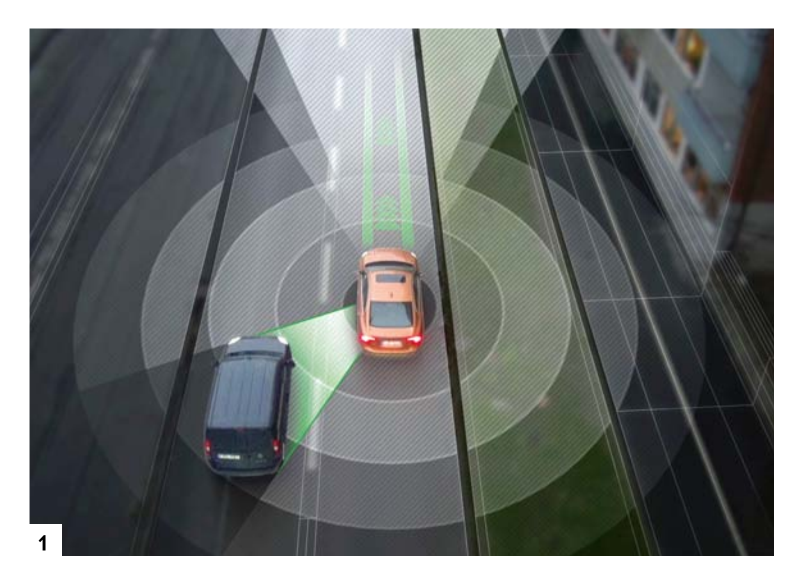
un estándar muy alto para los sistemas de conducción autónoma: como mínimo, deberán ser tan seguros como los conductores humanos. Para alcanzar este grado de fiabilidad se requerirá un desarrollo inmensamente mayor del que los entusiastas de la automatización quieren creer.

Piense en la frecuencia con que se cuelga su ordenador. En el caso de un automóvil, un retraso de tan solo una décima de segundo en la respuesta del programa supondría con gran probabilidad un peligro para el tráfico. Por tanto, los programas que se encarguen de la conducción autónoma deberán diseñarse conforme a unos estándares radicalmente distintos a los aplicados en la actualidad a los dispositivos electrónicos de consumo.

El establecimiento de metodologías y protocolos entrañará profundas dificultades y precisará avances básicos en informática y en procesamiento de señal. Hacen falta nuevos procedimientos para diseñar programas que garanticen un funcionamiento correcto y seguro incluso en condiciones complicadas y muy cambiantes. Hoy existen métodos formales que permiten analizar todos los posibles fallos de un fragmento de programa antes de escribirlo (pueden verse como una especie de «demostración matemática» para programas informáticos), pero solo funcionan en aplicaciones muy sencillas [*véase* «Lo que Church y Turing ya sabían sobre mi portátil», por Salvador Lucas, *en este mismo número*]. Es ahora cuando los científicos están estudiando cómo aumentar la escala de este tipo de pruebas para validar la complejísima programación requerida para controlar un vehículo completamente autónomo.

Una vez que se haya escrito el programa, los ingenieros informáticos necesitarán nuevas herramientas de depuración y verificación. Los métodos existentes son demasiado engorrosos y costosos para llevar a cabo esta tarea. Para ponerlo en perspectiva, téngase en cuenta que la mitad del coste de un avión militar o comercial nuevo se destina a verificar y validar sus programas. Y el sistema informático de un avión es, en realidad, mucho menos complejo que el que se requerirá en los vehículos de carretera automatizados. Un ingeniero puede diseñar un piloto automático para un avión sabiendo que en muy raras ocasiones, si es que se presenta alguna, tendrá que vérselas con más de una o dos aeronaves en sus inmediaciones. Al piloto automático no le hace falta conocer la velocidad y la posición de los otros aparatos con precisión milimétrica, ya que la distancia a la que se encuentran le da margen para actuar. Las decisiones deben tomarse en un tiempo del orden de decenas de segundos. Por el contrario, un vehículo de carretera automatizado tendrá que vigilar la trayectoria de docenas de vehículos, localizar obstáculos y tomar decisiones en una fracción de segundo. La complejidad del programa aumentará en varios órdenes de magnitud con respecto a la del que hace volar a un aeroplano.

Cuando se valide el programa, los fabricantes necesitarán «demostrar» la seguridad de un sistema de conducción completamente automatizado que satisfaga a los gestores de riesgo de la empresa, a las compañías de seguros, a los defensores de la seguridad vial, a las autoridades y, por supuesto, a los clientes. La clase de «ensayos de aceptación» formales que se usan hoy resultan del todo impracticables para este propósito. Quienes probasen un vehículo tendrían que hacer con él cientos de millones de kilómetros, si no miles de millones, para garantizar con suficiente confianza estadística que lo han sometido a las situaciones de peligro con las que se topará cuando miles de personas lo usen con regularidad. Ya se están pensando soluciones a este problema —la industria y el Gobierno alemanes han lanzado un proyecto al respecto de millones de euros—, pero por ahora se trata solo de esfuerzos incipientes.


1



2

EL PRÓXIMO AÑO, Volvo Cars probará sobre el terreno cien vehículos equipados con sistemas que automatizan la conducción en tramos especiales de autopista (*1 y 2*). En Europa también se han empleado vehículos Volvo en ensayos de trenes de carretera (*3*).

CORTESÍA DE VOLVO CAR GROUP (*1–3*)

El programa informático que controlará al vehículo, su «cerebro», no es el único componente que debe someterse a un examen detallado. También habrá que analizar con minuciosidad los sensores que suministran a ese cerebro los datos que empleará para tomar decisiones. Los ingenieros han de desarrollar nuevos algoritmos de fusión de datos y procesamiento de señales que puedan distinguir entre objetos inofensivos y peligrosos situados en la trayectoria del vehículo, sin apenas falsos negativos (un objeto peligroso que no se ha identificado) y con poquísimos falsos positivos (un objeto inofensivo que se ha clasificado erróneamente, con las consiguientes respuestas inapropiadas, como un viraje brusco o un frenazo).

Para alcanzar tales objetivos, los ingenieros no pueden recurrir al mismo tipo de redundancia por fuerza bruta usada en los aviones comerciales, ya que un coche automatizado es un producto de consumo que debe ser asequible para la población general. Acudir a la inteligencia artificial tampoco parece una solución obvia. Algunas personas han sugerido que los algoritmos


3

de aprendizaje automático podrán lograr que los sistemas de conducción autónoma estudien los datos de millones de horas de conducción para, después, ir aprendiendo en el transcurso de su ciclo de vida. Sin embargo, el aprendizaje automático presenta sus propios problemas, ya que se trata de una técnica no determinista. De una misma cadena de montaje podrían salir dos vehículos idénticos que, un año después, y como consecuencia de haberse enfrentado a situaciones de tráfico diferentes, acaben comportándose de manera muy distinta.

UN FUTURO DE NIVEL CUATRO

Antes solía decir que los sistemas de conducción de nivel cinco, plenamente automatizados, no serían factibles antes de 2040. A partir de cierto momento se me empezó a atribuir la afirmación de que el nivel cinco llegaría *en* 2040. Ahora digo que no disfrutaremos de vehículos plenamente automatizados y capaces de conducir en cualquier circunstancia hasta 2075. ¿Podría ocurrir antes de ese año? Sin duda. Pero no mucho antes.

Las perspectivas para la automatización de nivel tres también se ven empañadas por el problema, muy real, de que ante una emergencia haya que recuperar la atención de un conductor que está en las nubes mientras contempla el paisaje o, peor, que se ha dormido. He oído a representantes de varios fabricantes de automóviles decir que se trata de una cuestión tan difícil de resolver que, sencillamente, no intentarán el nivel tres. Exceptuando los asistentes de conducción en atascos, que toman el control cuando se está parando y arrancando todo el rato (es decir, donde la velocidad es tan baja que el peor choque no irá más allá de un parachoques abollado), cabe pensar que la automatización de nivel tres no se producirá nunca.

A pesar de todo, dentro de poco veremos vehículos con un alto grado de automatización, probablemente en el próximo decenio. Casi todos los grandes fabricantes de automóviles y muchas compañías tecnológicas están dedicando importantes recursos a los sistemas de nivel cuatro: conducción plenamente automatizada, pero restringida a entornos específicos y que no depende de la intervención de un conductor humano falible. Cuando se limitan las situaciones en que los sistemas autónomos pueden actuar, su viabilidad aumenta mucho. (Los transportes automatizados de personas llevan años funcionando en los grandes aeropuertos, pero circulan por carriles separados por completo.)

Con toda probabilidad, los próximos diez años traerán sistemas de aparcacoches automáticos que permitirán a los conductores dejar sus vehículos en la entrada de un garaje equipado de modo conveniente y que excluya el acceso de peatones y coches no automatizados. Un sistema instalado a bordo se comunicará con sensores distribuidos por todo el recinto para localizar los sitios disponibles y circular hasta ellos. Dado que no habrá necesidad de abrir las puertas, las plazas de aparcamiento serán más estrechas que hoy, de modo que cabrán más vehículos en garajes en áreas donde el espacio es caro.

En zonas peatonales urbanas, parques empresariales, recintos universitarios y otros lugares donde se excluya a los vehículos veloces, circularán lanzaderas sin conductor. En tales entornos podría bastar con sensores de capacidad reducida para detectar a peatones y ciclistas. Y, si se produjese un falso positivo y el vehículo frenara sin necesidad, no se causarían daños (aunque los pasajeros se podrían irritar). El proyecto CityMobil2, de la Comisión Europea, lleva varios años probando estas técnicas y tiene programada la demostración final para este verano.

Gracias a los carriles separados para autobuses y camiones, los vehículos comerciales funcionarán pronto con niveles más altos de automatización. Separar físicamente a estos vehículos del resto de los usuarios simplificará muchísimo los sistemas de detección de amenazas y de respuesta. Al final, un tren o fila india —disposición que ahorra combustible— de autobuses y camiones sin conductor podrá seguir a un vehículo conducido por una persona. Diversos grupos de investigación de todo el mundo, entre ellos el programa PATH de la Universidad de California en Berkeley, el proyecto japonés Energy ITS y los proyectos europeos KONVOI y SARTRE, ya han ensayado prototipos de sistemas de trenes, de autobuses y de camiones.

Sin embargo, lo más probable es que la automatización de nivel cuatro se aplique en el próximo decenio, sobre todo, como sistema autónomo de autopista para vehículos de pasajeros de uso personal. Bajo ciertas condiciones, permitirán que los automóviles se conduzcan a sí mismos en secciones de autopista designadas para ello. Los vehículos contarán con subsistemas y componentes redundantes para que, si surgen complicaciones, puedan volver a casa sin intervención humana en modo «precario» de funcionamiento. Seguramente se restringirá su uso a los momentos de buen tiempo y a tramos de autopista cartografiados con todo detalle, incluidas la señalización y las marcas de los carriles. Estas secciones de carretera podrían incluso incorporar «puertos seguros» a los que puedan acudir los vehículos en caso de problemas. La mayoría de los grandes fabricantes de automóviles están trabajando para desarrollar estos sistemas; Volvo Cars planea realizar el año que viene un ensayo público sobre el terreno con 100 prototipos en la ciudad de Gotemburgo.

Puede que estos escenarios no suenen tan futuristas como el que evoca un chófer electrónico personal, pero serán factibles —e incluso inevitables— dentro de poco.

PARA SABER MÁS

Technical challenges for fully automated driving systems. Steven Shladover. Presentado en el *21st World Congress on Intelligent Transport Systems*, Detroit, Michigan; 7-11 de septiembre de 2014.

Towards road transport automation: Opportunities in public-private collaboration. Actas del tercer congreso *EU-U.S. Transportation Research Symposium*, Washington, D.C., 14-15 de abril de 2015. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2015.

Taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems. Definiciones para el informe de 2014 de SAE International: **www.sae.org/misc/pdfs/automated_driving.pdf**

EN NUESTRO ARCHIVO

Seguridad dinámica para automóviles. Steven Ashley en *IyC*, marzo de 2009.

Stuart Russell es profesor de ciencias de la computación de la Universidad de California en Berkeley y experto en inteligencia artificial.



ANÁLISIS

¿HEMOS DE TEMER A LOS ROBOTS SUPERINTELIGENTES?

Si no actuamos con cuidado, podremos acabar enfrentados a máquinas inteligentes y decididas cuyos objetivos entren en conflicto con los nuestros

Stuart Russell

* *



S DIFÍCIL EVITAR LA INQUIETANTE SOSPECHA DE QUE LA CREACIÓN DE máquinas más inteligentes que nosotros *podría* convertirse en un problema. Si los gorilas hubieran creado por accidente a los humanos mucho tiempo atrás, es probable que hoy, en peligro de extinción, desearan no haberlo hecho. Pero ¿por qué, en concreto, resulta problemática la inteligencia artificial (IA) avanzada?

La idea de Hollywood según la cual unas máquinas conscientes se vuelven malignas de modo espontáneo y capitanean ejércitos de robots asesinos no es más que una tontería. El verdadero problema tiene que ver con la posibilidad de que la IA llegue a ser extraordinariamente competente en la consecución de unos resultados que no sean los que deseamos. El legendario matemático Norbert Wiener, fundador de la cibernética, lo explicaba de este modo en 1960: «Si para alcanzar nuestros propósitos usamos medios mecánicos en cuyo funcionamiento no podemos interferir de manera eficaz, [...] más nos valdrá estar completamente seguros de que el propósito de la máquina sea uno que realmente deseemos».

Una máquina que tiene un objetivo concreto cuenta con otra característica que solemos asociar a los seres vivos: el deseo de preservar su propia existencia. No se trata de un rasgo innato en la máquina ni de uno introducido por los humanos: es una consecuencia lógica del simple hecho de que la máquina no puede alcanzar su propósito original si está muerta. Por tanto, si a un robot solo le damos la directriz de que nos haga el café, tendrá un buen incentivo para asegurar el éxito de su tarea inhabilitando su interruptor de apagado o incluso exterminando a quien interfiera en su misión. Si nos descuidamos, podríamos vernos participando en una suerte de partida de ajedrez global contra máquinas muy decididas y superinteligentes, cuyos objetivos habrían entrado en conflicto con los nuestros y en la que el tablero de juego sería el mundo real.

La perspectiva de participar en una partida de este tipo y perderla debería hacer reflexionar a los expertos en computación. Algunos investigadores defienden que podremos encerrar a las máquinas tras algún tipo de barrera protectora y usarlas para que resuelvan problemas complejos, pero sin permitirles jamás intervenir en el mundo real (por supuesto, esto significaría



Así pues, encuentra *beneficioso* que lo apaguen, porque entiende que, si la persona lo hace, es para evitar que haga algo en contra de los valores humanos. De esta manera, el robot cuenta con un incentivo para mantener su botón de apagado intacto: uno que nace directamente de su incertidumbre sobre los valores humanos.

El tercer principio está inspirado en una subdisciplina de la IA denominada aprendizaje por refuerzo inverso (IRL), específicamente dedicada a captar los valores de algún ente —un ser humano, un perro o una cucaracha— mediante la observación de su comportamiento. El robot aprende la importancia del café para los humanos observando su rutina matutina. Este campo se encuentra en ciernes, pero ya existen algunos algoritmos prácticos que demuestran su potencial para el diseño de máquinas inteligentes.

A medida que el IRL evolucione, deberá encontrar maneras de lidiar con la irracionalidad, la incongruencia, la falta de voluntad y la limitada capacidad de cómputo de los humanos, que hacen que sus actos no siempre reflejen sus valores. Además, las personas manifiestan una gran diversidad de valores, lo que significa que los robots deben ser sensibles a los posibles conflictos y compromisos entre personas. Y algunos individuos son pura y llanamente malvados, por lo que no hay que ayudarlos ni emularlos.

A pesar de estas dificultades, creo que las máquinas podrán aprender lo suficiente sobre los valores humanos como para no constituir un peligro para nuestra especie. Las máquinas, además de observar directamente el comportamiento humano, contarán con la ayuda de una gran cantidad de información escrita y filmada sobre individuos realizando actividades (y sobre la reacción de otras personas). Es mucho más fácil diseñar algoritmos que entiendan esta información que crear máquinas superinteligentes. Asimismo, existen fuertes incentivos económicos para que los robots —y sus fabricantes— entiendan y reconozcan los valores humanos: si un robot doméstico cocinase un gato para la cena sin darse cuenta de que su valor sentimental es mayor que el nutricional, la industria de los robots domésticos se iría al garete.

Resolver el problema de la seguridad lo suficientemente bien como para poder seguir avanzando en IA parece factible, pero no será fácil. Probablemente tengamos décadas para planificar la llegada de las máquinas superinteligentes. Pero el problema no debería descartarse de antemano, como han hecho varios expertos en IA. Algunos argumentan que los humanos y las máquinas pueden coexistir mientras trabajen formando equipos; con todo, esta colaboración no será factible a menos que las máquinas compartan los mismos objetivos que los humanos. Otros afirman que basta con «desenchufarlas», como si las máquinas superinteligentes fueran tan estúpidas como para no pensar en esa posibilidad. Incluso hay quienes piensan que nunca existirá una IA superinteligente.

El 11 de septiembre de 1933, el célebre Ernest Rutherford afirmó con absoluta certeza: «Quien crea que la transformación de estos átomos proporcionará una fuente de energía no dice más que insensateces». El 12 de septiembre de 1933, el físico Leo Szilard inventó la reacción nuclear en cadena inducida por neutrones. IyC

renunciar a los robots superinteligentes). Por desgracia, no es probable que semejante plan funcione: aún hemos que inventar barreras que nos protejan de los seres humanos ordinarios, no digamos ya de máquinas superinteligentes.

Sin embargo, ¿podríamos afrontar directamente la advertencia de Wiener? ¿Es posible diseñar sistemas de IA cuyos objetivos no entren en conflicto con los nuestros? La tarea resulta bastante complicada; después de todo, los cuentos sobre el genio de la lámpara y los tres deseos suelen concluir con que el último deseo deshace los anteriores. Con todo, considero que tal objetivo es posible si el diseño de sistemas inteligentes se atiene a tres principios fundamentales:

El propósito de la máquina debe ser maximizar el cumplimiento de los valores humanos. En concreto, la máquina no tiene ningún propósito propio ni ningún deseo innato de protegerse a sí misma.

Al principio, la máquina no debe estar segura de cuáles son dichos valores. Esto resulta crucial y, en cierto modo, evita el problema de Wiener. Por supuesto, la máquina puede ir aprendiendo los valores humanos sobre la marcha, pero no alcanzar una certeza absoluta sobre ellos.

La máquina debe ser capaz de aprender acerca de los valores humanos observando lo que hacemos las personas.

Los dos primeros principios pueden parecer antiintuitivos, pero, juntos, sortean el problema de que los robots cuenten con un fuerte incentivo para inhabilitar su interruptor de apagado. El robot está seguro de que quiere maximizar los valores humanos, pero al mismo tiempo es incapaz de identificarlos con exactitud.

ZOOLOGÍA

LOS GENIOS DEL MAR

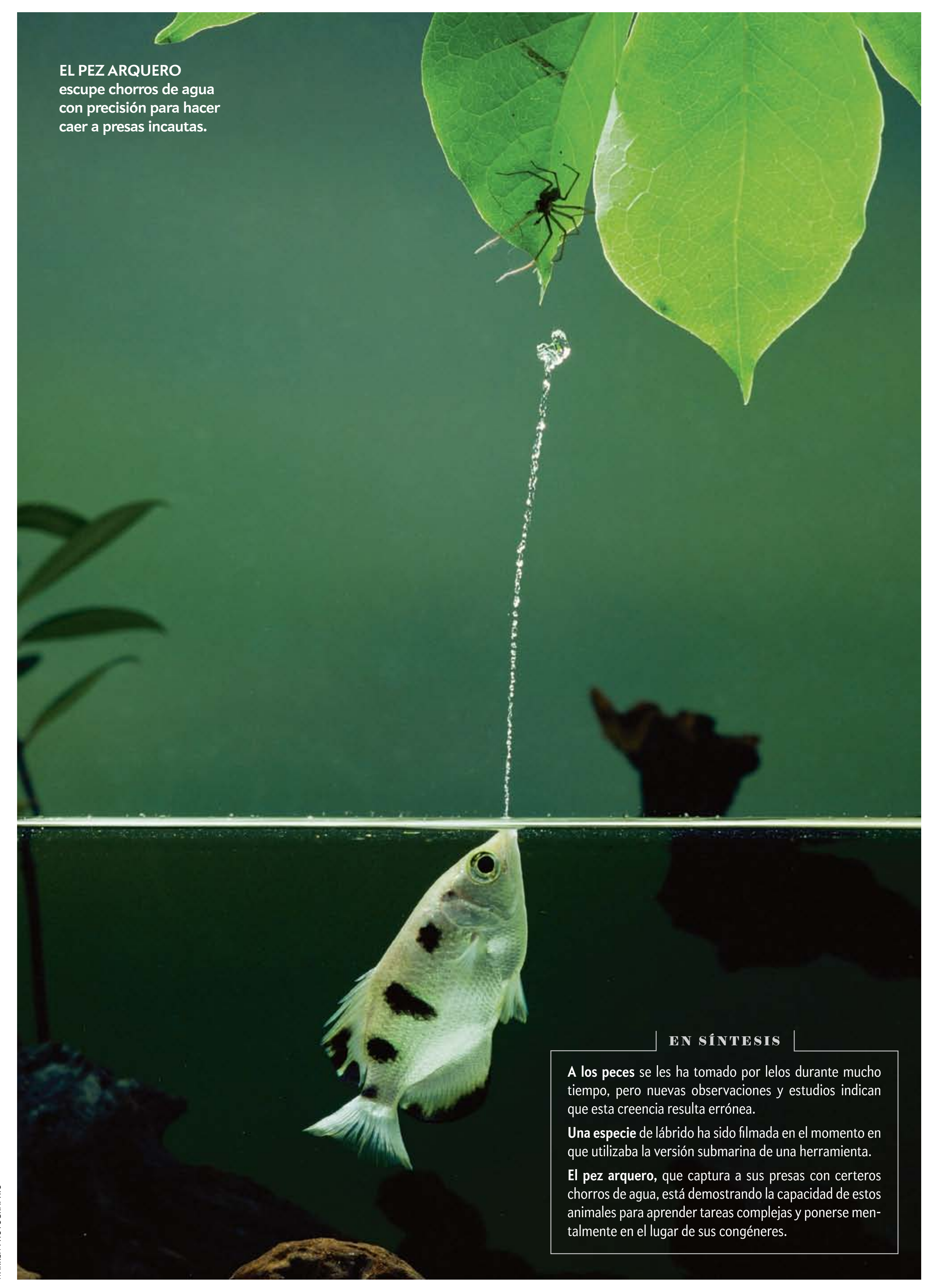
Algunos peces son capaces de resolver problemas. En ocasiones, hasta usan herramientas

Jonathan Balcombe

Mientras buceaba en el archipiélago de Palau, en la Micronesia, el biólogo Giacomo Bernardi presenció algo inusual que tuvo la gran suerte de filmar. Una vieja de colmillos (*Choerodon anchorago*) removió el agua para desenterrar una almeja oculta en la arena, luego la tomó con la boca y nadó hasta una roca situada a una treintena de metros. Allí logró abrirla con maña: primero, sujeta con la boca, la golpeaba con frenesí contra la roca y después la dejaba caer sobre ella. En los veinte minutos siguientes devoró otros tres bivalvos, que logró romper con la misma maniobra.

Bernardi, profesor de la Universidad de California en Santa Cruz, seguramente sea el primer científico que ha logrado filmar el uso de herramientas por parte de los peces. Se mire como se mire, se trata de un comportamiento sorprendente. Durante mucho tiempo el uso de útiles ha sido considerado un atributo exclusivo de los humanos y hasta la década pasada se desconocía su existencia en otros animales, aparte de los mamíferos y las aves.

El vídeo de Bernardi revela nuevas sorpresas en cada visionado. De buen principio no me percaté de que la vieja no desenterraba la almeja como uno esperaría, escupiendo agua. En realidad, le daba la espalda y cerraba de golpe sus opérculos, generando así un chorro de agua, de forma análoga a como un libro abierto crea un soplo de aire cuando se cierra con fuerza. Pero, dejando al margen el uso de herramientas, la filmación alberga más sorpresas: la vieja planificaba sus acciones, mostrando una notable flexibilidad al combinar de forma lógica comportamientos separados en el tiempo y el espacio. Su conducta recuerda al uso de bastones y pajitas por parte de los chimpancés para extraer a las termitas de sus nidos.



EL PEZ ARQUERO escupe chorros de agua con precisión para hacer caer a presas incautas.

EN SÍNTESIS

A los peces se les ha tomado por lelos durante mucho tiempo, pero nuevas observaciones y estudios indican que esta creencia resulta errónea.

Una especie de lábrido ha sido filmada en el momento en que utilizaba la versión submarina de una herramienta.

El pez arquero, que captura a sus presas con certeros chorros de agua, está demostrando la capacidad de estos animales para aprender tareas complejas y ponerse mentalmente en el lugar de sus congéneres.

WARREN PHOTOGRAPHIC

O a los monos capuchinos de Brasil, que emplean pesadas piedras para cascar frutos secos sobre rocas aplanadas. O a los cuervos, que dejan caer frutos secos en medio de cruces de tráfico abarrotados y aprovechan los semáforos en rojo para recoger los pedazos que las ruedas de los vehículos han roto para ellos.

A mitad de camino, nuestra vieja se detuvo para probar con una piedra más pequeña que yacía en la arena. Propinó un par de golpes con poco convencimiento y siguió su camino tras decidir que el empeño no valía la pena. ¿Quién no se ve reflejado en estos intentos fallidos y en cómo revelan la futilidad de la vida?

Estos hechos resultarían asombrosos en el comportamiento de cualquier animal. Que su artífice sea un pez casa mal con la concepción general que sitúa a esta clase zoológica en el límite inferior del espectro de inteligencia. Y aún más si consideramos que lo observado por Bernardi ese día no era excepcional. Otros investigadores han observado un comportamiento similar en otros lábridos, como *Choerodon schoenleinii* en la Gran Barrera de Arrecife australiana, *Halichoeres garnoti* en las costas de Florida o *Thalassoma hardwicke* en cautividad. En este último caso, se le ofreció al pez gránulos de alimento demasiado grandes como para ser engullidos de un bocado y demasiado duros como para partirlos con las mandíbulas. El pez llevó un gránulo hasta una de las rocas del acuario y lo aplastó de forma parecida a como hizo la vieja con la almeja. El zoólogo responsable de la observación, Łukasz Paśko, de la Universidad de Breslavia, en Polonia, lo vio repetir ese comportamiento en quince ocasiones, si bien solo al cabo de muchas semanas de cautividad. Paśko describió el comportamiento como «sorprendentemente estereotipado» y «casi siempre eficaz».

Los escépticos pueden aducir que ese tipo de conductas no implican un uso real de útiles, puesto que los peces no empuñan un objeto para manipular otro, tal como hacemos los humanos al emplear un hacha para obtener leña, o los chimpancés cuando usan bastones para llevarse a la boca sabrosas termitas. El propio Paśko define el comportamiento de los lábridos como algo «similar al uso de herramientas». Pero eso no lo hace menos relevante, pues al pez le resulta imposible romper una almeja o un gránulo de pienso con una herramienta propiamente dicha. En primer lugar, porque carece de extremidades que le permitan asir nada. Además, la densidad y la viscosidad del líquido elemento dificultan generar la fuerza suficiente con una herramienta; para comprobarlo, intente usted cascar una nuez bajo el agua lanzándola contra una roca. Y tomar una herramienta con la boca, la otra opción factible en su caso, resulta ineficiente, porque los pedazos de alimento escaparán flotando a disposición de merodeadores hambrientos.

TIRADOR CERTERO

Si la vieja aprovecha la fuerza del agua para remover la arena, el pez arquero (*Toxodes*) la emplea como arma de caza. Este Robin Hood tropical de veinte centímetros, ornado por una elegante librea de manchas negras sobre sus flancos plateados, habita las aguas salobres de los estuarios, manglares y arroyos de una vasta región que abarca desde la India hasta Filipinas, Australia y la Polinesia. Sus ojos son lo bastante anchos, grandes y móviles como para gozar de visión binocular. También posee un marcado prognatismo, que lo dota de su arma formidable: cuando presiona la lengua contra un surco de la mandíbula superior y comprime repentinamente la garganta y la boca, el pez arquero proyecta un chorro de agua de hasta tres metros en el aire, con una precisión que en algunos ejemplares roza la perfección cuando el objetivo se halla a un metro de distancia. No querría ser un escarabajo o un saltamontes posado en una hoja colgante sobre uno de los remansos donde acecha nuestro protagonista.

Su comportamiento es muy flexible. El pez arquero puede lanzar el chorro de una sola vez o en ráfaga. El objetivo puede ser un insecto, una araña, un lagarto joven, pedazos de carne cruda, modelos científicos de las presas habituales e incluso los ojos del observador o su cigarrillo encendido. Carga su arma según la talla de la presa, acumulando más agua para las más voluminosas y pesadas. Los más experimentados apuntan justo por debajo de la víctima posada sobre una superficie vertical, para hacer así que caiga al agua en lugar de salir proyectada hacia tierra.

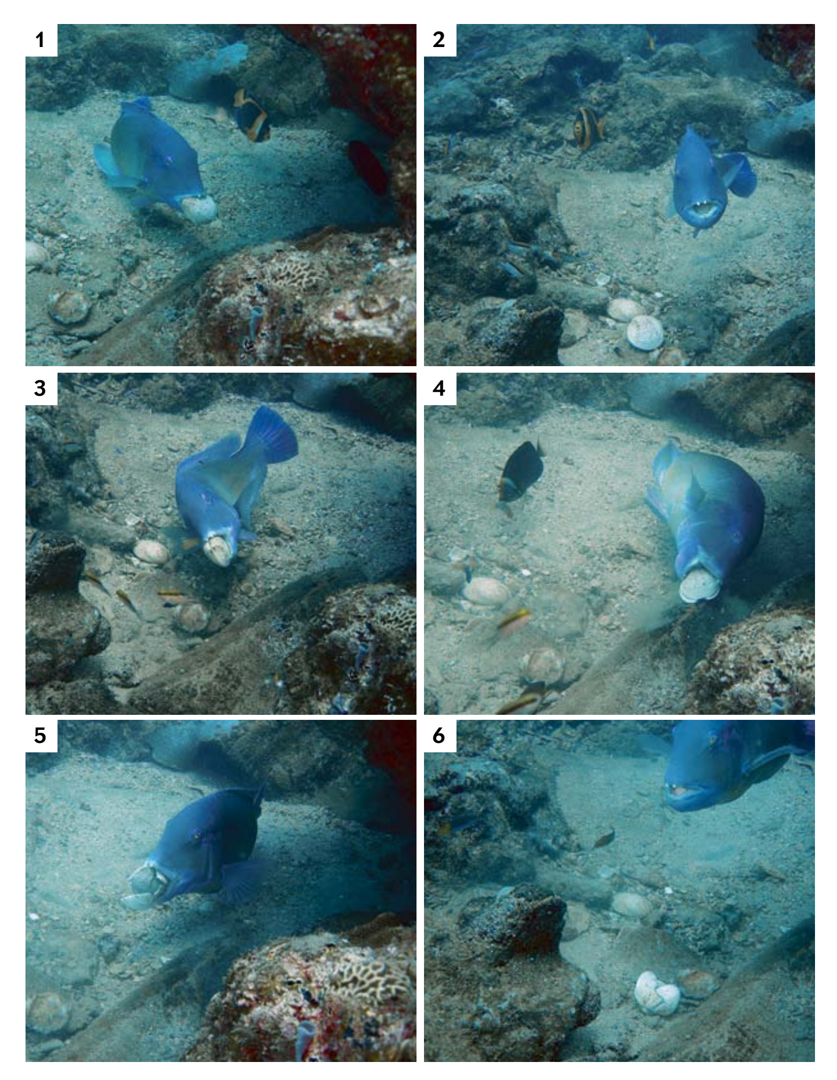
Lanzar agua a modo de proyectil es uno más de los recursos del arquero. La mayor parte del tiempo busca alimento bajo el agua, como cualquier otro pez. Y si la presa está a menos de treinta centímetros de la superficie del agua, puede tomar la ruta más directa: saltar y atraparla con la boca.

El pez arquero es gregario y es un observador nato, pero su aptitud para la caza no es innata y solo a base de mucha práctica consigue dar en la diana cuando se trata de blancos en movimiento. Investigadores de la Universidad Friedrich Alexander de Erlangen-Núremberg han observado que los peces novatos no aciertan aunque la presa se desplace a solo un centímetro por segundo. Pero tras observar a otros congéneres realizar unos mil lanzamientos a blancos móviles, unos certeros y otros no, logran alcanzar a presas que se desplazan a gran velocidad. La conclusión es que el pez arquero adopta el punto de vista de otros peces para aprender a dominar una tarea difícil. Los biólogos lo denominan «visión en perspectiva». Quizá carezca de la inteligencia del chimpancé, capaz de encaramar a un estornino herido a un árbol para ayudarle a volar, pero sin duda posee la capacidad para aprender adoptando la perspectiva de un tercero.

Las filmaciones a alta velocidad revelan que adopta diferentes estrategias en función de la velocidad y la posición de sus presas



Jonathan Balcombe es etólogo y escritor. Es responsable de sensibilidad animal del Instituto de Ciencia y Política de la Sociedad Humana de EE.UU. y editor asociado de la revista de la institución, *Animal Sentience* [*Sensibilidad animal*].



UNA VIEJA de la especie *Choerodon schoenleinii* abre un berberecho aplastándolo contra una roca, lo que para algunos científicos constituye un ejemplo del uso de herramientas.

rocas para romper almejas mucho antes de que nuestros antepasados empezaran a martillar metal al rojo vivo sobre un yunque durante la Edad de Hierro. Pero ¿pueden los peces improvisar el uso de herramientas ante situaciones inesperadas a imagen de nosotros? En mayo de 2014, un estudio reveló el uso innovador de una herramienta por parte de bacalaos atlánticos criados en cautividad para la investigación en acuicultura. Cada pez portaba una placa coloreada en la espalda, cerca de la aleta dorsal, para ser reconocido. El tanque disponía de un comedero de autodemanda accionado por una varilla con asa que los bacalaos aprendieron pronto a estirar con la boca.

Al parecer, algunos descubrieron que también podían obtener el alimento enganchando el asa con la placa de su espalda y nadando en dirección opuesta al comedero. Estos avispados bacalaos refinaron su técnica tras cientos de intentos, hasta orquestar una maniobra coordinada con tal propósito. Buena prueba de su refinamiento es que con esa argucia tardaron una fracción de segundo menos en hacerse con cada gránulo que estirando del asa con la boca. Que un pez interaccione con un objeto extraño para obtener alimento ya resulta sorprendente, pero que alguno conciba nuevos modos de emplear su marca identificativa demuestra originalidad y versatilidad.

El uso de herramientas por parte de los peces parece limitado a unos pocos grupos. El ictiólogo australiano Culum Brown sugiere que los lábridos podrían ser el análogo de los primates en los mamíferos y de los córvidos en las aves (cuervos, cornejas, urracas y arrendajos), pues acaparan la mayor parte de los ejemplos conocidos del uso de útiles. Quizá la vida en el medio acuático ofrezca menos oportunidades para el uso de herramientas que la vida en tierra firme. Pero sabemos que la vieja de colmillos y el pez arquero constituyen ejemplos soberbios de la capacidad ilimitada de la evolución para resolver problemas. Y podría haber muchas otras especies con capacidades parecidas. IyC

voladoras. Al emplear lo que los investigadores han bautizado como «estrategias de aprendizaje predictivo» el pez arquero ajusta la trayectoria del chorro a la velocidad de los insectos voladores: apuntan a mayor distancia de la presa cuanto mayor es su velocidad. Si la presa vuela bajo, a menos de veinte centímetros de la superficie del agua, suele adoptar otra estrategia bautizada como «lanzamiento con volteo». Esta maniobra consiste en arrojar agua al tiempo que se rota el cuerpo horizontalmente con el fin de imprimir al chorro un efecto que siga el desplazamiento lateral del objetivo en el aire y lo alcance.

El pez arquero también sabe compensar la distorsión óptica causada por la interfase agua-aire, pues aprende las leyes que rigen el tamaño aparente del objetivo y su posición relativa con respecto a él. Puede estimar con tino el tamaño absoluto de los objetos desde ángulos y distancias inusuales. Y me pregunto si también practica la entomología y reconoce visualmente a los insectos para saber si son sabrosos, si son demasiado grandes para ser engullidos o demasiado pequeños como para valer la pena, o si pican.

Es harto probable que el pez arquero haya estado lanzando chorros de agua por lo menos desde que los humanos comenzamos a tirar piedras, y sospecho que los lábridos ya usaban

CORTESÍA DE SCOTT GARDNER

PARA SABER MÁS

The archer fish. K. H. Lüling en *Scientific American*, julio de 1963.
The use of tools by wrasses (Labridae). G. Bernardi en *Coral Reefs*, vol. 31, n.º 1, pág. 39, marzo de 2012.
Innovative behaviour in fish: Atlantic cod can learn to use an external tag to manipulate a self-feeder. Sandie Millot et al. en *Animal Cognition*, vol. 17, n.º 3, págs. 779-785, mayo de 2014.
Competition drives sophisticated hunting skills of archerfish in the wild. Ingo Rischawy et al. en *Current Biology*, vol. 25, n.º 14, págs. R595-R597, julio de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Inteligencia animal. Colección *Temas* de *IyC*, n.º 78, 2014.



EN LAS GALÁPAGOS, los turistas campan por doquier y su presencia altera los hábitats y perturba a especies únicas: jóvenes leones marinos (*arriba*), una iguana marina (*arriba, derecha*) y delicadas plantas en la isla Isabela (*abajo, derecha*).

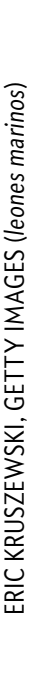
ECOLOGÍA

PRESIÓN TURÍSTICA SOBRE LA VIDA SILVESTRE GALÁPAG

El constante aumento de visitantes podría arruinar en pocos años la riqueza ecológica de un lugar único en el mundo *Paul Tullis*

En el extremo meridional de la isla de Santa Cruz, en las Galápagos, una cárcava conocida como Las Grietas alberga una peculiar especie de pez loro, de unos 45 centímetros de longitud y colores vivos. La charca se originó hace mucho tiempo, cuando olas enormes rebasaron las altas orillas de la isla y alcanzaron un abrupto barranco. Hoy, el nivel del agua se mantiene gracias al agua dulce que se infiltra a través de la porosa roca volcánica en que está excavado el barranco. A pesar de las duras condiciones, la pequeña población de peces ha prosperado en la charca, de aguas tan cristalinas que es posible verlos desde veinte metros de altura rebuscando alimento en el fondo.

En agosto de 2014 visité el lugar acompañado por el naturalista Andrés Vergara. Nos citamos en el Eco Hotel Fich Bay y desde allí caminamos unos diez minutos sobre suelo irregular y trechos de arena hasta alcanzar un lugar menos abrupto. Afrontamos entonces la parte final del recorrido, primero cuesta arriba sobre rocas escarpadas y luego bajando de espaldas por las empinadas paredes del barranco, como cangrejos, hasta alcanzar el borde



DE LAS

OS

de la charca. Este último trecho es bastante peligroso, por lo que disuade a la mayoría de los visitantes fortuitos; solo unos pocos aventureros han osado descender alguna vez hasta ella. El lugar es magnífico, y las cornisas rocosas, situadas a una decena de metros sobre el agua, ofrecen a los más osados trampolines naturales para zambullirse en sus aguas.

Tuvimos suerte de visitar el lugar en aquel momento, pues poco después el acceso a Las Grietas fue cerrado para realizar obras de mejora en el camino de acceso. Reabierto en diciembre de 2014, Vergara, que trabaja como guía para el Parque Nacional Galápagos, me llamó para explicarme que habían construido pasarelas sobre las rocas, una escalera para acceder a la orilla y una plataforma de madera para saltar a la charca. «Es parte del plan del Parque Nacional Galápagos para facilitar las cosas


MATT MOYER, GETTY IMAGES (*iguana*); DOUG CHEESEMAN, GETTY IMAGES (*turistas*)



a los visitantes y a los residentes», me dijo. Las mejoras habían incrementado drásticamente el número de visitantes, que entre los meses de julio de 2014 y 2015 se triplicó y alcanzó los 7109 excursionistas anuales.

Se ignora el impacto de esa muchedumbre sobre la población de peces loro. ¿Acabarán las inevitables migas de bocadillo, la crema solar disuelta en el agua y las bolsas de plástico contaminando el entorno y arruinando el encanto del lugar?

Desde que Charles Darwin visitara las islas en 1835 y las viera como un laboratorio de la selección natural, las Galápagos han sido reconocidas en todo el mundo como uno de los mejores lugares para la observación de fauna. El archipiélago alberga 14 especies de tráupidos, conocidos como pinzones de Darwin, y 12 especies de tortugas terrestres. Pájaros bobos y flamencos confluyen en él separados por escasos kilómetros. La abundancia de pescado es tal que los leones marinos no sienten la necesidad de molestar a los pájaros bobos, a quienes devoran en otras partes del mundo. Todos estos atractivos naturales, publicitados en brillantes folletos y en páginas web, constituyen el motivo principal que ha impulsado durante décadas a un puñado de viajeros acaudalados y con espíritu aventurero a emprender el largo viaje hasta el archipiélago.

Sin embargo, en los últimos años el goteo de turistas se ha convertido en una riada. A principios de los años noventa, las Galápagos recibían 41.000 visitantes anuales. En 2013, superaron los 200.000 por primera vez. Un nuevo récord se alcanzó en 2015, cuando las visitaron más de 224.000 turistas. Este crecimiento se ve fomentado en parte por las necesidades de Ecuador, afectado por problemas económicos. El 44 por cien de sus exportaciones dependen del petróleo, y el Gobierno ha decidido promover el turismo para mantener los ingresos en un contexto de caída de precios. Para ello, está facilitando el crecimiento del turismo en las islas y promoviendo proyectos como el de Las Grietas.

«El Gobierno trabaja descaradamente en favor del turismo en las Galápagos; no hay duda», afirma Swen Lorenz, economista que entre 2011 y 2015 fue director ejecutivo de la Fundación Charles Darwin, entidad responsable de asesorar al Gobierno en temas ambientales.

Es posible gestionar el turismo de modo que preserve las áreas naturales, beneficie a la población local y además financie la conservación de los hábitats y las especies. Pero hasta ese ecoturismo tiene un impacto sobre los hábitats; además, hace ya tiempo que ese no es el único turismo existente en las Galápagos. El incremento de turistas amenaza directamente aquello que todo el mundo viene a ver: la vida salvaje. De las 20 especies endémicas de las Galápagos que se hallan en peligro crítico, 16 habitan en las cuatro islas más visitadas. Nuevas especies invasoras, traídas en gran parte por los visitantes, están colonizando nichos ecológicos; un ejemplar de iguana verde, capaz de transmitir enfermedades a las especies endémicas, fue capturado en Puerto Ayora, en la isla de Santa Cruz, en agosto. Nadie sabe cómo llegó hasta allí y si con ella llegaron otras.



Paul Tullis es director editorial de la revista digital *TakePart*. Ha escrito para *Scientific American Mind*, *The New York Times Magazine* y *Slate*, entre otras publicaciones.



Las Galápagos no serían el primer enclave sensible dañado de forma irremediable por el turismo. Los visitantes rompen los corales de la Gran Barrera para llevárselos. Los cruceros turísticos ponen rumbo a la frágil Antártida. Y un supermercado Walmart se erige ahora en Teotihuacán, la antigua ciudad mesoamericana de México que con tanto esmero se excavó y restauró en su día. Ecuador, al permitir el desarrollo descontrolado del sector turístico, podría estar sembrando la semilla de la destrucción de una joya de la biodiversidad. Si eso sucediera, el archipiélago podría perder el interés para los turistas y con ello los ingresos que aportan.

En 2013, Ecuador inició la senda para poner a las Galápagos en el camino de la sostenibilidad. El presidente Rafael Correa ordenó un estudio sobre el impacto del creciente turismo en las islas. El resultado fue claro: si no se limitaba de inmediato el número de visitantes, el crecimiento turístico pondría en peligro la biodiversidad del archipiélago y su atractivo para los turistas. Hasta el momento, empero, el Gobierno de Correa ha hecho oídos sordos a la recomendación.

EL MÁXIMO DE TURISTAS ACEPTABLE

El proceso para evaluar el impacto del turismo se inició a finales del verano de 2013, cuando Arturo Izurieta recibió una sorpren-

EN SÍNTESIS

El rápido aumento del número de visitantes a las Galápagos amenaza la biodiversidad que los turistas vienen a admirar. Ecuador ha fomentado la situación para obtener ingresos. Pero el anterior director del Parque Nacional Galápagos, despedido hace poco, y varios expertos independientes reclaman fijar un techo en el número anual de visitantes, debido al riesgo de devastación de las islas.

El informe presentado por expertos a inicios de 2014 aconsejaba no superar los 242.000 visitantes anuales, pero según ellos, el Gobierno del presidente Correa lo ha ignorado.

Entretanto, el servicio de parques está construyendo pasarelas y otras infraestructuras destinadas a facilitar el acceso a lugares ecológicamente sensibles, que podrían verse desbordados. Y pequeños hoteles ilegales han proliferado para alojar a la incesante riada de turistas.

MAPPING SPECIALISTS (*mapa*)



NUEVAS PASARELAS Y ESCALERAS, como estas en la isla de Bartolomé, facilitan el acceso de los numerosos visitantes a lugares prístinos, lo que supone una amenaza para el paisaje y la vida silvestre.

JOEL SARTORE, GETTY IMAGES

dente llamada de Lorena Tapia, entonces ministra ecuatoriana de medioambiente. Izurieta, un ecuatoriano que había vivido más de 25 años en las Galápagos, se hallaba trabajando en Australia en temas de conservación. Tapia le ofreció la oportunidad de regresar al archipiélago para ocupar el mismo puesto que había desempeñado en los años noventa: director del Parque Nacional y Reserva Marina de las Galápagos.

Además, Tapia quería que Izurieta afrontara el problema del desarrollo sostenible, según apunta el propio Izurieta. (Tapia ha declinado, a través de un portavoz, ser entrevistada por *Scientific American*). El presidente Correa, le dijo, había solicitado un informe sobre cuántos turistas podían albergar las Galápagos. ¿Cuántos lugares podían abrirse al turismo? ¿Cuál era el impacto global de la presencia humana sobre las islas? Esta última era una pregunta muy interesante, recuerda Izurieta. «Ella me preguntó: "¿Cómo vamos a averiguar todo esto?"». El presidente quería la respuesta en un año.

Izurieta empezó en septiembre. Enseguida creó una comisión de expertos, con Stephen J. Walsh, geógrafo que dirige el Centro de Estudios de las Galápagos en la Universidad de Carolina del Norte, en Chapel Hill, y Carlos Mena, codirector junto a Walsh del Centro Científico de las Galápagos, gestionado conjuntamente por la citada universidad estadounidense y la Universidad San Francisco de Quito. El grupo incluía biólogos, geógrafos e incluso un profesor de una escuela de negocios.

Se definieron varios escenarios de crecimiento del número de turistas y se pidió al Gobierno que escogiera cuál de ellos prefería según sus objetivos, a saber, la obtención de ingresos, la conservación de la biodiversidad o un equilibrio entre ambos. El escenario que uno escoja depende de la cantidad de riesgo que se esté dispuesto a asumir, comenta Walsh, y de las prioridades del Gobierno. Si, por ejemplo, se decide duplicar el número de turistas, debe aceptarse un mayor riesgo de alteración del hábitat, así como más vertidos de gasoil y contaminación procedente de los cruceros. «Cada vez que se toma una decisión sobre el número de personas, esta influye en cómo serán las Galápagos en el futuro», explica Walsh.

Walsh y Mena elaboraron modelos matemáticos de los ecosistemas de las islas para determinar el modo en que diferentes grados de crecimiento con distintos tipos de turistas podían afectar a varios aspectos ambientales. Las 19 islas y los aproximadamente 145 lugares protegidos sufrirán diferentes impactos según si los turistas bajan a tierra o permanecen a bordo de los cruceros, por ejemplo. Hasta la nacionalidad de los visitantes resulta relevante: el volumen de residuos aumenta más rápido en paralelo con la proporción de turistas estadounidenses. El equipo incorporó datos recabados durante décadas para alimentar los algoritmos y simular el modo en que cambios en un factor podían afectar al resto de ellos.

A medida que incrementaban el número anual de visitantes, el modelo reveló la existencia de umbrales críticos, puntos en que los efectos negativos empezaban a modificar el ambiente de forma drástica, abocando a ciertas especies al borde del desastre. En resumen, los modelos pusieron de manifiesto un círculo vicioso provocado por el crecimiento desaforado del turismo. Ceder a las demandas de los inversores privados para permitir nuevos desarrollos turísticos destruiría el hábitat y, por consiguiente, acabaría con la fauna y la flora. Al cabo de una década, el declive de las especies sería tan evidente que la propia industria turística se vería afectada. Como consecuencia, los programas para recuperar las especies amenazadas se verían privados de los fondos necesarios. «Si seguimos creciendo», afirma Izurieta, «alcanzaremos un punto de no retorno muy pronto.»

¿En cuánto tiempo? En 2017, de acuerdo con el informe de Izurieta, a menudo citado como *Escenarios para la sostenibilidad*. Permitir el crecimiento ilimitado incrementaría los

beneficios económicos para Ecuador durante los diez años siguientes, en comparación con los demás escenarios. Pero los ingresos del turismo alcanzarían su máximo en 2027 y luego caerían. «El número de visitas se desplomaría hasta ser inferior al que tenemos hoy», advierte Izurieta.

El escenario alternativo consistente en estabilizar el número de visitantes en 242.000 anuales reportaría menos beneficios hasta 2027, pero garantizaría que se mantuvieran a este nivel durante décadas. Este límite, afirma Izurieta, se ha establecido atendiendo a la capacidad de carga de las áreas protegidas, entendida como el número de visitas recibidas durante cierto período de tiempo. Imponerlo implicaría prohibir la construcción de grandes hoteles y reducir la demanda de pequeños hoteles ilegales, pero al mismo tiempo permitiría la continuidad sin trabas del ecoturismo de bajo impacto y elevado presupuesto que han acogido las islas durante décadas.



CIERTAS ESPECIES DE TORTUGAS GIGANTES se han recuperado gracias a los proyectos de conservación financiados en parte con la venta de entradas para visitar el parque nacional. Si se gestiona correctamente, el turismo puede coexistir con las especies autóctonas.

La comisión de Izurieta finalizó su informe en febrero de 2014. Según él y otros dos conservacionistas con los que hablé, durante la mayor parte de ese año Tapia discutió el contenido del informe con el ministro de turismo, el director nacional de planificación, el presidente del Consejo de Gobierno de las Galápagos y el director del servicio de parques nacionales. El grupo tuvo varios encuentros para pulir la presentación que se haría ante el presidente Correa, según Izurieta. «En esos encuentros existía consenso para recomendar el escenario de sostenibilidad.»

Sin embargo, el grupo tuvo dificultades para lograr que los políticos nacionales se preocuparan por el ambiente a principios de 2015. Los legisladores se limitaron a revisar la Ley Especial de Galápagos de 1998, donde se determinaban cuestiones como el salario mínimo y el número de licencias para embarcaciones. Se decidió retrasar la presentación del informe de Izurieta al presidente Correa hasta que se aprobara una nueva ley. Eso sucedió en junio de 2015.

Pero dos meses antes la ministra de medioambiente despidió a Izurieta sin explicaciones, según afirma este. Tapia, a través de su portavoz, declinó hacer comentarios. El informe ha permanecido en un estante desde entonces, apuntan diversas fuentes.

HOTELES ILEGALES, INVERSORES EXTRANJEROS

Izurieta cree firmemente que es preciso limitar la afluencia de turistas. «Las Galápagos constituyen uno de los destinos turísticos más rigurosamente gestionados», afirma Matt Kareus, director ejecutivo de la Asociación Internacional de Operadores de Viajes en Galápagos. «Mientras [Izurieta] estuvo al frente [del parque] no se incrementó el impacto en los lugares protegidos. Estaba muy bien gestionado.» Pero la presencia de turistas, no importa cuán respetuosos con el ambiente sean, siempre lleva aparejado un riesgo. Simplemente, transportar combustible para realizar viajes de bajo impacto implica un aumento de los vertidos, de las emisiones de carbono y de la erosión. Los ecoturistas pueden llevar consigo especies invasoras de forma involuntaria, como cualquier otro visitante. La mosca parásita que está acabando con el pinzón de manglar seguramente fue introducida en los años sesenta, cuando el número de turistas no alcanzaba la vigésima parte del actual.

«Aún estamos a tiempo de estabilizar el número de turistas, pero hemos de empezar ya», me dijo Izurieta por teléfono en abril de 2015. «Si no lo hacemos, no sé qué les puede suceder a las islas.» Es fácil entender por qué las playas de arena blanca, el mar a 26 °C, las vistas espectaculares y las actividades como el buceo con tubo o la navegación con kayak de mar pueden hacer de las Galápagos «un destino de vacaciones como cualquier otro, con hoteles, balnearios y calles llenas de tiendas vendiendo camisetas», afirma Lorenz, antiguo director de la Fundación Charles Darwin.

El Gobierno de Correa no parece estar tomando medidas para moderar el crecimiento y confía únicamente en que los cambios en la Ley Especial disuadan al sector turístico. Al no tomar partido, los dirigentes de Ecuador están apostando por el crecimiento descontrolado. Continúan garantizando a las aerolíneas vuelos adicionales al aeropuerto Seymour, el mayor del archipiélago, en la isla desierta de Balta. Conceden a los turistas permisos para entrar en el parque aun cuando los solicitantes son incapaces de demostrar que se alojarán en un hotel legal, tal como se requiere formalmente y cuando los hoteles ilegales campan por todas partes. Y los funcionarios expiden los llamados permisos de residencia temporal sin fecha de caducidad.

Quienes conocen la situación no creen que a corto plazo se vaya a imponer un techo en el número de turistas, pues los asesores de Correa no quieren anunciar la mala noticia de que el crecimiento turístico debe ralentizarse. «No creo que vaya a fijarse ningún límite», afirma Juan Carlos García, director de conservación de la rama ecuatoriana del Fondo Mundial para la Conservación de la Naturaleza (WWF). «Nadie osa proponer una cifra.»

Dos de los cambios introducidos en abril, durante la aprobación de la nueva Ley Especial, podrían complicar aún más la situación. En primer lugar, se ha eliminado el requisito de que los accionistas mayoritarios de cualquier inversión hecha en las islas sean habitantes de estas; ahora solo se exige que la población local esté «implicada» en los nuevos proyectos, un término ambiguo y abierto a la interpretación. En segundo lugar, se permite variar los límites del parque. Técnicamente, la combinación de ambas modificaciones permitiría a un inversor extranjero entrar como una tromba, construir en lo que fuera un espacio protegido y dejar pocos beneficios a la población local a cambio de sus pérdidas ecosistémicas.

En ausencia de limitación legal, el número de turistas alojados en hoteles seguramente aumentará, afirma Kareus, miembro de la Asociación Internacional de Operadores de Viajes en Galápagos. Este tipo de visitante consume más energía y genera más residuos que quienes visitan el archipiélago a bordo de cruceros. El Parque Nacional Galápagos regula a través de su

MANFRED GOTTSCHALK, GETTY IMAGES

sistema de gestión el número de turistas que visita las áreas sensibles, como la isla Seymour, donde espléndidos rabihorcados y piqueros patiazules anidan, o la Bahía Tortuga, donde los quelonios marinos entierran sus huevos. Pero el sistema fue diseñado para una relación entre turistas de crucero y turistas de hotel de 1:1 o de 1:2.

Hoy existen cinco veces más camas en hoteles que en cruceros, una ratio de 1:5, según las estadísticas oficiales citadas por Izurieta, que ha reemplazado a Lorenz como director de la Fundación Charles Darwin. Y todo ello sin tener en cuenta los numerosos alojamientos ilegales que se están creando, especialmente en la isla de Santa Cruz. Hace una década se aprobó una moratoria para la creación de nuevos hoteles o la ampliación de los existentes, pero nunca se aplicó, explica Felipe Cruz, director ejecutivo delegado de la fundación, quien ha vivido treinta años en la isla. Una de las casas de su barrio añadió recientemente dos plantas y, acabada la obra, Cruz se sorprendió al ver en ella un cartel de «Hotel».

De acuerdo con Cruz y otros informantes, gran parte de las nuevas edificaciones ofrecen alojamiento barato a mochileros universitarios y viajeros de fin de semana procedentes de Sudamérica. Para la creciente clase media de la región, un vuelo de 300 dólares desde Santiago de Chile o desde Buenos Aries a Balta es más accesible que nunca.

Izurieta saluda la reciente suspensión de la moratoria al desarrollo de hoteles porque cree que estimulará la construcción de nuevos alojamientos mejor regulados. Legalizar lo que se iba a construir de todos modos permitiría su supervisión por parte de las autoridades. Aunque el Ministerio de Turismo afirma que la capacidad de cada nuevo hotel se limitará a 35 habitaciones, deberá resistir las presiones del sector, de acuerdo con Izurieta. Lorenz me hizo llegar documentos redactados por una firma de asesoramiento financiero llamada Stock & Fund Managers, según los cuales esta empresa y un grupo de inversión asociado se habían asegurado dos lugares de primera calidad para la construcción de 39 chalets y dos hoteles con un total de 95 habitaciones, uno de los cuales dispondría de restaurantes, zonas recreativas, salas de reuniones, balneario y piscinas.

Según Lorenz, en 2014 Hoteles Kempinski, con sede en Alemania, y Waldorf Astoria Hotels & Resorts presentaron planes al presidente Correa para complejos aún mayores. Los hoteleros afirmaron no tener proyectos confirmados en las islas y el Ministerio de Turismo de Ecuador declinó hacer declaraciones, aunque hizo público un comunicado el 9 de septiembre de 2015 declarando que la aprobación por parte del Consejo de Gobierno de las Galápagos de tres proyectos con una capacidad conjunta de 36 habitaciones confirmaba una vez más la prohibición de los megahoteles en las Galápagos.

VOLUNTAD POLÍTICA

La conservación y el turismo no resultan incompatibles en las Galápagos y los ingresos aportados por los visitantes pueden ayudar a conservar el entorno con su fauna y flora. He visitado un centro de cría destinado a recuperar una tortuga gigante casi exterminada por las ratas, que devoran sus huevos. Poco después de mi visita, un estudio publicado en *PLOS ONE* informaba de que un programa de cría en cautividad similar en la isla Española, sumado a los esfuerzos para erradicar las cabras, había tenido tanto éxito que la población se consideraba estabilizada. Las tasas de entrada en el parque financian gran parte de este trabajo, junto a los fondos aportados por las organizaciones conservacionistas. Las condiciones para la vida silvestre en las islas deshabitadas, donde las especies invasoras como las cabras habían medrado a sus anchas, también están mejorando gracias a otros programas de conservación financiados por el turismo.

Eliécer Cruz, antiguo director del Parque Nacional Galápagos a quien el presidente Correa nombró presidente del Consejo de Gobierno de las Galápagos en abril de 2015, me dijo el pasado octubre que estaba trabajando para modificar el sistema de inmigración con el fin de limitar la afluencia de visitantes. También me dijo que él y los ministros interesados habían mantenido conversaciones justo hasta el día previo a la presentación del informe *Escenarios de sostenibilidad* al presidente Correa. Según él, es muy importante limitar el número de visitantes a 242.000 al año, la cifra que según el informe sería sostenible. Pero en febrero de este año, el jefe del Parque Nacional Galápagos, Walter Bustos, confirmó que el informe aún no había sido presentado.

Bustos me explicó que el nuevo ministro de medioambiente, Daniel Ortega, había decidido actualizar la información del informe de Izurieta. Cuando pregunté a Walsh acerca de ello, este me contestó en un correo electrónico que no se trataba de cambiar los resultados aportados por las simulaciones anteriores del modelo. sino de analizar con detalle los aspectos económicos del turismo en las Galápagos.

En cualquier caso, Bustos opina que no será fácil fijar el techo de 220.000 turistas anuales y añade: «Creo que se puede alcanzar esa cifra con otras políticas». Destaca la restricción a 35 habitaciones en el tamaño de los nuevos hoteles y la necesidad de su aprobación por el Consejo de Gobierno de las Galápagos como ejemplos de medidas que moderarán el crecimiento del turismo. La pregunta es si puede hacerse antes de rebasar la barrera de los 242.000 visitantes anuales, algo que al ritmo actual sucederá en la primera mitad de 2017.

Izurieta no quiso hablar sobre los motivos de su despido. En abril, poco después de perder su empleo, escribió en Facebook que había sido una decisión política y que si bien la respetaba, no estaba necesariamente de acuerdo con ella.

Entretanto, la construcción de instalaciones turísticas prosigue con paso firme, con un presupuesto adjudicado de 2,5 millones de dólares. Parte del mismo se destinará a la caleta Tagus, en la isla Isabela, donde el 29 de septiembre de 1835 Darwin halló «grandes lagartos negros de tres o cuatro pies de largo». No deja claro en su diario si arribó en barca o hizo la dura travesía a pie cruzando las colinas circundantes, pero en cualquier caso, la cala es remota. El servicio de parques planea construir escaleras. IyC

PARA SABER MÁS

The beak of the finch: A story of evolution in our time. Jonathan Weiner. Knopf, 1994.

Plundering paradise: The hand of man on the Galápagos islands. Michael D'Orso. Harper, 2002.

Galápagos at the crossroads: Pirates, biologists, tourists and creationists battle for Darwin's cradle of evolution. Carol Ann Bassett. *National Geographic*, 2009.

The Galápagos: A natural history. Henry Nicholls. Basic Books, 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

La selección natural y los pinzones de Darwin. Peter R. Grant en *IyC*, diciembre de 1991.

El legado de Darwin. Gary Stix en *IyC*, enero de 2009.

LAS SECUELAS DEL AGENTE



UN PELOTÓN DE SOLDADOS busca bombas sin detonar en el aeropuerto vietnamita de Da Nang, en 2011, antes de que los obreros remuevan el suelo y lo calienten para destruir la dioxina, un compuesto tóxico contenido en el agente naranja. Las fuerzas armadas de EE.UU. diseminaron el agente como defoliante durante la guerra de Vietnam en los años sesenta.

NARANJA

Vietnam insiste en que aún hay niños afectados por el tristemente célebre defoliante empleado hace décadas por Estados Unidos. Las pruebas al respecto son controvertidas

Charles Schmidt





Charles Schmidt es redactor científico especializado en salud global y medio ambiente. Visitó Vietnam para informar sobre el legado del agente naranja.



NACIDO CON LABIO LEPORINO, fisura palatina y cardiopatía congénita, Danh (seudónimo) pasó su primer mes de vida luchando por respirar en una incubadora. Ahora tiene ocho años y es delgado como un palillo. De sonrisa afable, no puede hablar, y su madre, a quien llamaremos Lien, dice que es discapacitado mental. Mientras me habla de las muchas necesidades del niño en su casa de Da Nang, este se entretiene con coches de juguete.

A Lien la conocí por mediación de una asociación estadounidense llamada Niños de Vietnam, que ayuda a familias pobres de esa localidad. Nos sentamos a tomar un té en una habitación sencilla que daba a la calle y hablamos alzando el tono por encima del tráfico. De la pared colgaban fotos de familia junto a un retrato de Ho Chi Minh, el líder revolucionario comunista de Vietnam. Las facciones de Lien, dulces de costumbre, se endurecieron cuando le pregunté qué pensaba que había causado los problemas de su hijo: «¡El culpable es el agente naranja!», exclamó a través de su intérprete, con la mirada encendida de ira.

El agente naranja es un defoliante esparcido por EE.UU. durante la guerra de Vietnam para aclarar la vegetación espesa y dejar al descubierto a las tropas enemigas. Estaba contaminado con dioxina, un veneno que persiste durante décadas en el ambiente. El abuelo de Danh luchó en el Altiplano Central, una zona intensamente rociada, y su padre trabajó en la antigua base de EE.UU. en Da Nang, donde años más tarde se halló dioxina en los patos y peces consumidos por los lugareños. Las dioxinas se han vinculado con el cáncer, las cardiopatías y otros problemas de salud que afectan a las personas expuestas a ellas. Pero Lien está convencida de que su hijo heredó el legado tóxico debido a la exposición de que fueron víctimas su padre y su abuelo. El Gobierno vietnamita, que considera a Danh como una presunta víctima del agente naranja, afirma que cientos de miles de ciudadanos nacidos una o dos generaciones después del conflicto se enfrentan a los efectos nocivos de las dioxinas transmitidos por sus progenitores.

El Gobierno de EE.UU. ofrece una modesta indemnización a sus veteranos de guerra por problemas de salud como la leucemia, el linfoma de Hodgkin y el párkinson que se atribuyen al agente naranja, basándose en los detallados registros de los soldados que se hallaban sobre el terreno durante las operaciones de fumigación. Los científicos han recurrido a tales registros en los estudios que han vinculado el agente con más de una docena de enfermedades en hombres y mujeres que participaron en los combates. Pero el Gobierno se ha negado a reconocer que el defoliante también afectase a los vietnamitas, en parte porque asegura que Vietnam no ha facilitado datos fiables sobre quiénes estuvieron expuestos. Las historias clínicas del país son precarias y la población sufrió grandes desplazamientos en los caóticos años de la posguerra, lo que dificulta demostrar que se estuvo expuesto al agente.

Vietnam afirma que sus datos son fidedignos, pero el desacuerdo ha alimentado la tensión durante años, sobre todo por lo que respecta a los efectos que podrían heredar las generaciones venideras. A pesar de que las pruebas llevadas a cabo por Estados Unidos en animales han demostrado que el daño genético causado por las dioxinas es heredable, la sensibilidad varía mucho según la especie, y no existen estudios en humanos. Robert Moore, toxicólogo de la Universidad de Wisconsin en Madison, advierte de que sería muy difícil demostrar que los hallazgos en animales reflejan la experiencia humana.

En un intento de suavizar las relaciones, el Congreso de EE.UU. aprobó en diciembre de 2014 una partida de ayuda humanitaria por valor de 21 millones de dólares para cinco años que, por primera vez, iba destinada expresamente a las personas con discapacidad grave que viven en zonas rociadas con el agente. Charles Bailey, antiguo director del Programa del Agente Naranja en Vietnam del Instituto Aspen, describe esa ayuda como un gran paso que asegura que la ayuda humanitaria de EE.UU. llegue a los más necesitados. Sin embargo, el paquete de ayuda no hace referencia explícita al agente como causante de las discapacidades. Es más un gesto simbólico para apaciguar la posición vietnamita que una admisión de culpa. Han

EN SÍNTESIS

Los médicos vietnamitas afirman que el agente naranja, un defoliante esparcido durante la guerra de Vietnam, causa defectos genéticos en los hijos y nietos de los que estuvieron expuestos a él.

Ensayos con animales en EE.UU. muestran que el daño genético causado por la dioxina del agente naranja es heredable, si bien la vulnerabilidad varía mucho en las especies analizadas. No hay estudios en humanos.

Científicos estadounidenses afirman que la investigación vietnamita que vincula la exposición al agente con las anomalías congénitas adolece de fallos. Las autoridades de Vietnam no han permitido a los expertos estadounidenses llevar a cabo estudios en su país.

Sin admitir ninguna culpa, el Congreso de EE.UU. aprobó una partida de 21 millones de dólares para ayudar a las personas discapacitadas en Vietnam, pero este país reclama una ayuda mucho mayor.

PÁGINAS ANTERIORES: NGUYEN HUY KHAM, REUTERS; EN ESTA PÁGINA: KAZUYOSHI NOMACHI, CORBIS




VIETNAM ASEGURA que cientos de miles de hijos y nietos de ciudadanos expuestos al agente naranja padecen anomalías congénitas como las que se muestran aquí, entre ellas la de una persona dotada de mano y hombro, pero no de brazo. El Gobierno de EE.UU. argumenta que las anomalías congénitas obedecen a múltiples causas.

PAULA BRONSTEIN, GETTY IMAGES (*izquierda*); CHAU DOAN, GETTY IMAGES (*derecha*)

pasado cuarenta años desde que las tropas estadounidenses abandonaran Saigón (hoy Ciudad Ho Chi Minh) y sellaran así el fin de la guerra. Pero las preguntas básicas sobre el legado de los efectos del agente naranja en la salud de varias generaciones de vietnamitas siguen siendo controvertidas.

LA DIOXINA, EL MALO DE LA PELÍCULA

Con sus bulevares frondosos y cafés de moda, el casco urbano de Da Nang es hoy muy distinto de aquella ciudad portuaria que acogió a las fuerzas estadounidenses durante la guerra. Ciclomotores y motocicletas abarrotan la carretera que une la ciudad con la vieja base aérea de Da Nang y actual aeropuerto internacional. Desde allí, las fuerzas de EE.UU. y de Vietnam del Sur lanzaron en 1962 la operación *Ranch Hand*, el programa de guerra herbicida.

Producido sobre todo por Monsanto y Dow Chemical, el agente naranja era una mezcla a partes iguales de los herbicidas 2,4-D y 2,4,5-T, que las tropas estadounidenses dispersaron en un principio a petición del Gobierno survietnamita. También fumigaron con otros productos, como los agentes blanco, azul, rosa, verde y violeta, nombrados así por el color de la banda de los bidones que los contenían. El objetivo: despojar al adversario de la cubierta arbórea que le servía de escondite. La fumigación tuvo lugar principalmente en Vietnam del Sur y en zonas de Laos. Esparcidos desde el aire, en solo dos días los herbicidas mataron toda la vegetación fumigada.

Hasta 1969 no se descubrió que el agente naranja y la mayoría de las otras mezclas habían sido contaminados involuntariamente con la dioxina más tóxica, la TCDD. Cuando la operación *Ranch Hand* concluyó en 1971, dos años después de que se descubriese la contaminación, se habían esparcido al menos 75 millones de litros de herbicida, a los que estuvieron expuestos entre 2,1 y 4,8 millones de habitantes, según un análisis publicado en 2003 por Jeanne Stellman, catedrática emérita de política y gestión sanitaria de la Universidad de Columbia.

Los estudios en animales demuestran que la TCDD es uno de los compuestos más tóxicos que se conocen. Amén de causar daños hepáticos, cáncer y problemas inmunitarios en los animales expuestos, es sumamente tóxica para el feto. Suministrada a una rata gestante, una dosis inferior a una parte por mil millones (equivalente a una sola gota en unos 53.000 litros de agua) provoca la feminización del embrión masculino. Las dosis del orden de 100 partes por mil millones en roedores y peces causan anomalías congénitas como fisura palatina, disfunción renal, problemas cardíacos y fragilidad ósea.

La TCDD actúa por canales misteriosos: algunas especies sucumben a dosis mínimas, mientras otras son más resistentes. Algunas especies son sensibles al principio y se tornan más resistentes con la edad. Hay diferencias hasta dentro de la misma especie, asegura Linda Birnbaum, directora del Instituto Nacional de Ciencias de Salud Ambiental, en Carolina del Norte. La sensibilidad de la especie humana se ignora por los graves problemas éticos que plantea su estudio. Esa incertidumbre ha avivado enconados debates sobre lo que constituye un nivel «seguro» de exposición en nuestra especie.

¿ADN DAÑADO DURANTE GENERACIONES?

En el Museo de los Vestigios de la Guerra del Vietnam, en Ciudad Ho Chi Minh, el visitante puede tener la impresión de que las pruebas científicas son incontestables: imágenes de personas deformes cuelgan de paredes anaranjadas, junto a mapas que muestran dónde se dispersaron los defoliantes. Una nota explica que los efectos de las dioxinas «se pueden transmitir a muchas generaciones a causa del daño producido en los genes y las moléculas de ADN». Los hospitales de Vietnam tienen salas enteras dedicadas a las presuntas víctimas del agente, entre ellas nietos de personas que afirman haber estado expuestas.

Los estudios con ratas no demuestran que las generaciones de vietnamitas estén sufriendo los efectos de las dioxinas, pero aportan indicios de que es plausible. En esa situación hipotética, la exposición durante la guerra habría afectado a los espermatozoides y a los óvulos embrionarios (las células germinales) en ciertos períodos vulnerables del embarazo, lo que causó cambios heredables de una generación a otra.

Hoy se están logrando avances importantes que indican que el compuesto en cuestión tiene efectos duraderos e incluso generacionales. Las nuevas pruebas obtenidas con roedores en laboratorios de todo el mundo demuestran que la TCDD altera el epigenoma, esto es, el sistema biológico que controla qué genes de la célula permanecen activos. A esta regulación, llamada epigenética, se debe que todas las células del embrión acaben formando tejidos distintos a pesar de heredar los mismos genes maternos y paternos. Los genes responsables de que una célula genere el latido del corazón, por ejemplo, se activan mediante un proceso epigenético, mientras que otro proceso de esa naturaleza desactiva los genes que harían que transmitiese los impulsos nerviosos en el cerebro.

La TCDD puede reprogramar los controles epigenéticos, con consecuencias que podrían aparecer mucho tiempo des-

pués de haber sido eliminada por el cuerpo. «Los efectos no sobrevienen necesariamente en el momento de la exposición», explica Michael Skinner, biólogo de la Universidad del Estado de Washington. «En cambio, el epigenoma puede quedar alterado de forma permanente y sus efectos materializarse en cualquier momento de la vida.» La prueba de ello proviene del laboratorio de Álvaro Puga, biólogo molecular de la facultad de medicina de la Universidad de Cincinnati, que dio TCDD a hembras de ratón gestantes y descubrió que las crías nacían con defectos cardíacos que no eran peligrosos hasta la edad adulta.

Cuando Skinner expuso a dosis elevadas de TCDD a ratas gestantes, comprobó que la segunda y la tercera generación de descendientes mostraban altos índices de enfermedades renales y ováricas y que, en la cuarta, presentaban un recuento de esperma más bajo. Al preguntarle si esos resultados guardaban relación con la experiencia de las personas expuestas a la dioxina en Vietnam, Skinner respondió categóricamente que sí. Algunos ponen en duda esa conexión, así como la relevancia de sus estudios con lo ocurrido en Vietnam, en parte porque las ratas reciben dosis muy superiores a las que sufrió la población humana.





EL AGENTE NARANJA deshojaba los árboles y dejaba al descubierto las tropas. En 1970, un lustro después de ser rociado, el manglar de la imagen inferior aún estaba devastado, en contraste con el intacto de la imagen superior.

El caso de Vietnam se ve complicado por la persistencia de la TCDD en el ambiente, cuyos efectos se podrían sumar a los generados por la transmisión a través de la línea germinal. La vida media de la TCDD en el cuerpo humano es de siete a diez años. Su vida media en el suelo y en los sedimentos se prolonga unas décadas más, con la consiguiente acumulación en los peces y patos, alimentos básicos de los vietnamitas, entre ellos el padre de Danh.

Los estudios realizados entre la década de los noventa y mediados de la siguiente por Hatfield Consultants, asesoría radicada en Vancouver, revelaron siete puntos críticos donde las concentraciones medidas en el suelo y en los sedimentos superaban las 1000 partes por billón (nuevos datos señalan hasta 28 puntos críticos). Según Thomas Boivin, director de operaciones internacionales de Hatfield, los tres más contaminados correspondían a las antiguas bases aéreas survietnamitas y estadounidenses en Da Nang, Phu Cat y Bien Hoa. En un estudio de 2015, técnicos de la Agencia para el Registro de Sustancias Tóxicas y Enfermedades, adscrita a los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC), aún hallaron concentraciones nocivas en peces capturados en estanques de Bien Hoa.

Puga cree que la TCDD se acumula paulatinamente en el tejido graso de quien consume alimentos contaminados, hasta un punto en que la capacidad de depuración del organismo se ve superada. Advierte de que si la grasa de la mujer embarazada libera el compuesto en la sangre, el bebé podría recibir una dosis enorme. Sin embargo, sin mejores datos sobre la exposición a la TCDD y su concentración en la sangre, esa situación es poco más que una conjetura. Los defectos congénitos afectan ya a un 3 por ciento de los neonatos en todo el mundo, y los vietnamitas se hallan a la cabeza en el uso de plaguicidas agrícolas que causan ese mismo tipo de defectos en animales de laboratorio. La población también sufre una carencia crónica de ácido fólico, que protege contra los defectos del sistema nervioso durante la gestación.

DATOS ESCURRIDIZOS

Mientras citaba estudios vietnamitas inéditos, Le Ke Son, jubilado hace poco de su cargo como director del Comité 33, organismo a cargo de las actividades relacionadas con el agente naranja en Vietnam, reiteró en un correo electrónico que me envió que los porcentajes de anomalías congénitas y de complicaciones del parto en las zonas fumigadas y en los puntos críticos eran sin duda más altos que en las zonas de control sin fumigar. Le Ke Son es médico y toxicólogo y sigue dirigiendo el programa nacional de investigación sobre las dioxinas. Su opinión se considera más razonable que la de la línea dura del Gobierno. Sin embargo, los especialistas estadounidenses suelen descartar la investigación vietnamita, aduciendo que rara vez se publica en revistas occidentales de prestigio. Además, las autoridades no han permitido que expertos estadounidenses lleven a cabo estudios en el país. En 1995, funcionarios vietnamitas detuvieron a Arnold Schecter, hoy profesor en la facultad de medicina de la Universidad de Louisville, cuando trataba de salir del país con muestras de sangre humana destinadas al análisis de las dioxinas.

En 2000 se abrió un resquicio a la realización de estudios de colaboración, cuando David Carpenter, director del Instituto de Salud y Medioambiente de la Universidad estatal de Nueva York en Albany, propuso un proyecto de cinco años con un coste de un millón de dólares. Pretendía extraer muestras de sangre a parturientas en hospitales de tres ciudades: Ciudad Ho Chi Minh, cercana al punto de exposición al agente más importante; Hanoi, muy distante, y la provincia de Thua Thien Hue, donde también se fumigó mucho. Buscaría la posible relación entre los niveles de TCDD en la sangre y tres tipos de defecto congénito: falta de extremidades, anomalías del tubo neural y labio leporino y fisura palatina.

Pero el plan se frustró. Según Carpenter, los Institutos Nacionales de la Salud de EE.UU. (NIH) condicionaron su aprobación al visto bueno de Vietnam. Hanoi se tomó un año, después de lo cual los NIH declararon que solo subvencionarían un estudio piloto de 350.000 dólares. Vietnam no lo aceptó. A raíz de nuevas trabas, los NIH y la citada universidad clausuraron el proyecto.

«Dediqué tres años a redactar esas propuestas y a viajar en multitud de ocasiones a Vietnam. Y todo en balde», se lamenta. «Fue la mejor oportunidad para emprender un estudio de colaboración y estoy seguro de que no volverá a suceder.» Carpenter cree que su propuesta de trabajo puso nerviosos tanto a Hanoi como a Washington. «Las autoridades estadounidenses temían

AP PHOTO

que, si vinculábamos las anomalías congénitas con la dioxina, deberían afrontar indemnizaciones. Y las vietnamitas que, si no la confirmábamos, perderían los beneficios de las campañas que nos acusan de ellas.»

Carpenter admite que será difícil llevar adelante aquel estudio, o uno nuevo parecido. El análisis de las dioxinas precisa un volumen de sangre de 40 mililitros. Y añade que el instrumental es complejo y solo está disponible en un puñado de laboratorios en todo el mundo.

Nuevos resultados podrían aportar una luz muy necesaria. Hace treinta años se revisaron a conciencia los datos sobre anomalías congénitas en la población vietnamita. Maureen Hatch, hoy en el Instituto Nacional del Cáncer de EE.UU., analizó los estudios vietnamitas, las historias clínicas y las estadísticas oficiales y descubrió una retahíla de problemas; entre ellos, que había pocas medidas de referencia de antes de la guerra y que las zonas de control sin rociar eran insuficientes. Aun así, en un artículo de 1985 publicado en la revista *Teratogenesis, Carcinogenesis, and Mutagenesis*, Hatch y John Constable, escribieron que algunos estudios parecían mostrar un gran número de anomalías llamativas muy poco frecuentes. Algunos bebés nacieron sin cerebro y sin partes del cráneo; otros, sin ojos o con los miembros atrofiados o deformes.

Hatch y Constable concluyeron que la relación más robusta con la TCDD del agente naranja se daba en el embarazo molar. En estos casos, el espermatozoide fecunda un óvulo inviable y se forma una masa de tejido de aspecto tumoral que crece en el útero y en ocasiones se vuelve cancerosa. Un metanálisis más reciente ha afirmado que la exposición de los progenitores al agente en Vietnam parece estar vinculada con un aumento del riesgo de anomalías congénitas, pero las conclusiones son limitadas.

Más concluyente parece ser el análisis que el Instituto de Medicina de EE.UU. ha llevado a cabo desde 1991 en soldados que estuvieron expuestos a la TCDD. El informe bienal de 2014 del instituto apunta que hay «pruebas suficientes» sobre la relación de este compuesto con el sarcoma de tejidos blandos, los linfomas de Hodgkin y no hodgkinianos, y el acné clórico (ampollas cutáneas). También cita «pruebas limitadas o indicativas» de su asociación con el cáncer de laringe, pulmón y próstata, mieloma múltiple, neuropatía periférica temprana, párkinson, hipertensión, cardiopatía isquémica, ictus y diabetes de tipo 2. En particular, el informe exige pruebas para cualquier tipo de anomalía congénita «inadecuada», a excepción de la espina bífida, que figura en la categoría de «limitada o indicativa». El Departamento de Asuntos de los Veteranos de EE.UU. concede indemnizaciones para estos trastornos si el veterano de guerra puede demostrar que estuvo expuesto al agente naranja.

COMPENSACIÓN SIN ADMISIÓN DE CULPA

Las clasificaciones del Instituto de Medicina parecen ser el reconocimiento de Estados Unidos sobre los efectos directos del agente naranja. Pero la cuestión de si el defoliante tiene algo que ver con los problemas de salud que afectan a Vietnam, sobre todo los de las generaciones posteriores, se halla atrapada en un mar de disputas sobre la causalidad, la culpabilidad, la indemnización y la responsabilidad, afirma Bailey. En su opinión, el nuevo paquete de ayudas soslaya esos conflictos y simplemente da prioridad a grupos reducidos de personas con discapacidades más profundas.

El senador Patrick Leahy, de Vermont, que ha trabajado mucho tiempo para hacer frente a las amenazas ambientales heredadas de la guerra, coordinó la ayuda. Durante los años ochenta, Leahy desempeñó un papel decisivo en la creación de un fondo federal aún en vigor destinado a destruir las bombas sin detonar que se hallan esparcidas por los campos vietnamitas. Desde 2007 ha conseguido cerca de 100 millones de dólares para la descontaminación de las dioxinas en Vietnam. «Creo que hemos ido más allá de basar la indemnización en datos científicos», opina Timothy Rieser, asistente legal que trabaja para Leahy en temas del agente naranja. «Con su actuación, el Gobierno estadounidense ha aceptado la posibilidad de que algunas personas se viesen afectadas gravemente. Y la pregunta ahora es: ¿cómo podemos abordar mejor esta situación?»

Le Ke Son, antiguo miembro del Comité 33, está de acuerdo en que la ayuda humanitaria debe dar prioridad a las personas discapacitadas que residen en los puntos críticos, como Da Nang o Bien Hoa, entre otros. «Creo que 21 millones de dólares es un buen comienzo por parte del Gobierno de Estados Unidos. Pero no es suficiente.»

En un correo electrónico que me envió, un portavoz de Monsanto no confirmó ni negó que se produjeran contaminación o efectos sobre la salud derivados de la exposición al defoliante. Destacó que la Monsanto que fabricó el agente era otra empresa con la que la compañía actual solo comparte el nombre. Además añadió: «Los tribunales estadounidenses han fallado que los contratistas que fabricaron el agente naranja para el Gobierno no son responsables de las reivindicaciones vinculadas con su uso militar, puesto que se limitaron a cumplir las instrucciones dadas por este». El portavoz se negó a comentar si la dioxina podría tener efectos transgeneracionales. En otro correo, Dow Chemical declinó responder a mis preguntas; en su web, la compañía afirma que el Gobierno de Estados Unidos especificó cómo fabricar el agente y posteriormente controló su transporte, almacenamiento y uso.

En opinión de Stellman, las empresas químicas y gran parte del Gobierno estadounidense preferirían que los problemas de salud de Vietnam no se vinculasen nunca de manera concluyente con el agente. Por otra parte, afirma que los vietnamitas ven en la exposición a él la causa de casi todas las anomalías congénitas acaecidas en su país. Ambas partes se equivocan. Algunas anomalías probablemente sean atribuibles al agente naranja, pero saber cuántas es una incógnita que la ciencia no puede responder hoy. Aún no hay un estudio definitivo. IyC

PARA SABER MÁS

Agent orange and risks to reproduction: The limits of epidemiology. Maureen C. Hatch y Zena A. Stein en *Teratogenesis, Carcinogenesis, and Mutagenesis*, vol. 6, n.º 3, págs. 185-202, 1986.
«A Great Poison». Marguerite Holloway en *Scientific American*, noviembre de 1990.
Dioxin (TCDD) induces epigenetic transgenerational inheritance of adult onset disease and sperm epimutations. Mohan Manikkam et al. en *PLOS ONE*, vol. 7, n.º 9, art. e46249, 26 de septiembre de 2012. **http://journals.plos.org/plosone/ article?id=10.1371/journal.pone.0046249**
Veterans and agent orange: Update 2012. Instituto de Medicina. National Academies Press, 2014.
Children of Vietnam, a nonprofit aid group: **www.childrenofvietnam.org**

EN NUESTRO ARCHIVO

Un nuevo tipo de herencia. Michael K. Skinner, *IyC*, octubre de 2014.
Epigenética. Colección *Temas* de *IyC*, n.º 81, 2015.

por H. Joachim Schlichting



H. Joachim Schlichting es exdirector del Instituto de Didáctica de la Física de la Universidad de Münster.

¿Por qué se arrugan los dedos mojados?

Física y evolución del refinado mecanismo que emplea nuestro cuerpo para impedir que las cosas se nos resbalen de las manos en ambientes húmedos

Algunas expresiones del lenguaje cotidiano tienen su origen en el pasado remoto. «Cuando manejamos una situación, tratamos de que las cosas no se nos vayan de las manos y no permitimos que nadie nos manipule»; en frases como esta, nuestra forma de hablar refleja una función ancestral y clave para la supervivencia del ser humano: la de asir y utilizar objetos con las manos.

Entre las circunstancias aprovechadas por la selección natural para dotarnos de un agarre firme se encuentran las fuerzas de rozamiento entre la mano y el objeto en cuestión. Aun así, en ocasiones necesitamos una pequeña ayuda. Por ejemplo, si mientras cavamos nos escupimos de vez en cuando en las manos, aumentaremos la fricción entre ellas y el mango de la pala. Sin embargo, que las manos húmedas proporcionen un mejor agarre es más bien una excepción. Los gimnastas espolvorean en sus manos carbonato de magnesio, también conocido como magnesita, con el fin de absorber la transpiración y aumentar así el rozamiento.

¿En qué casos son el rozamiento y el agarre mayores y cuándo menores? De preguntas como esta se ocupa la tribología de la piel, que en los últimos años se ha convertido en una disciplina por derecho propio que, de hecho, ya nos ha ofrecido algunas ventajas prácticas. Hasta hace poco, ponerse crema en las manos significaba estar dispuesto a que se nos escurriese cualquier objeto de ellas. Hoy, sin embargo, ya hay cremas para la piel que garantizan un buen agarre inmediatamente después de su aplicación.

¿Adaptación evolutiva?

El grado de rozamiento entre dos objetos no solo depende de los respectivos materiales, sino también de la morfología de las superficies en contacto. Un ejemplo lo hallamos en las arrugas que aparecen en las manos y los pies después de un largo baño. Normalmente contemplamos este fenómeno con mayor o menor disgusto, pero ¿se trata realmente de un defecto? ¿O acaso nos beneficiamos de él, como cuando lavamos los platos y estos no se nos resbalan? Justamente por esa razón, las pinzas de sujeción de numerosas herramientas presentan superficies estriadas, ya que así su agarre resulta más firme. Así pues, ¿se debe la aparición de estas arrugas a las ventajas evolutivas que conlleva?

Eso es exactamente lo que sostiene un grupo de científicos de la Universidad de Newcastle dirigido por Tom Smulders y Kyriacos Kareklas. Hace unos años, estos investigadores pidieron a varios voluntarios que trasladasen canicas y pequeñas pesas de plomo de un recipiente a otro, asiéndolas entre el pulgar y el índice. En una primera serie de experimentos, los objetos se encontraban debajo del



ROZAMIENTO RUGOSO: El rozamiento entre dos objetos no solo depende de la naturaleza de los materiales, sino de la morfología de las superficies. Al igual que ocurre con los dibujos de un neumático, las arrugas que aparecen en los dedos mojados aumentan el rozamiento entre la mano y el objeto asido. En el caso de los pies, probablemente permitan que estos encuentren un mejor apoyo en el suelo. Algunos expertos sostienen que este fenómeno, de particular importancia en condiciones de humedad, es el resultado de una adaptación evolutiva.



ALICE KRÜSSMANN, *SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT* (*mano*); © ISTOCKPHOTO/TARATORKI (*pie*)





GENERACIÓN DE ESTRÍAS: Una esponja con un trozo de cinta adhesiva pegado encima proporciona un modelo sencillo del tejido cutáneo y de la capa córnea que lo recubre. Si estrujamos la esponja, simulando la contracción de las capas más profundas de la piel, la cinta se arruga. Lo mismo ocurre en los dedos. En ellos, el encogimiento cutáneo obedece a un estímulo del sistema nervioso.

CORTESÍA DE H. JOACHIM SCHLICHTING

agua; en una segunda, se hallaban secos. Además, los participantes tuvieron que completar el procedimiento una vez con los dedos secos y lisos y otra con las manos arrugadas, las cuales habían sumergido antes durante media hora en agua caliente.

No sorprende demasiado que los voluntarios manejasen más rápido los objetos secos que los mojados, con independencia de si tenían los dedos arrugados o lisos. Pero, con los cuerpos húmedos, los dedos estriados suponían una clara ventaja. Así que, según los investigadores, las arrugas podrían constituir una adaptación evolutiva para manejar objetos en condiciones de humedad. Por el momento, aún deben realizarse pruebas relativas a los pies, donde seguramente la aparición de los pliegues se encuentre relacionada con el apoyo sobre superficies resbaladizas.

Dedos sin nervios, dedos sin arrugas

Otros científicos establecen una relación directa entre las arrugas y el dibujo de los neumáticos de un automóvil, el cual proporciona un mejor agarre en entornos húmedos. Gracias a las carreras de coches y motos, sabemos que las bandas de rodadura lisas son las más adherentes en suelo seco. En una carretera mojada, sin embargo, los conductores prefieren neumáticos con dibujo, ya que este ayuda a expulsar el agua.

Según el equipo liderado por Mark A. Changizi, de los Laboratorios 2AI, en Estados Unidos, hay un hecho que confirma la tesis de que el dibujo de los dedos desempeña funciones similares al de los neumáticos: la morfología de las arrugas exhibe importantes similitudes con la de los sistemas naturales de drenaje, como puede observarse, por ejemplo, en las cuencas hidrográficas de los ríos [*véase* «La geometría de las redes fluviales»; Investigación y Ciencia, abril de 2015].

En favor de una explicación evolutiva habla también el hecho de que sean los procesos del sistema nervioso autónomo los que activan las arrugas. Durante largo tiempo se pensó que la responsable del fenómeno sería la hinchazón de las partes de la piel carentes de vello. Sin embargo, no ocurre así, ya que los dedos con nervios seccionados no se arrugan: son los impulsos nerviosos los que hacen que, al sumergir los dedos en agua, el tejido que subyace a la capa córnea (la más externa de la piel) comience a contraerse.

Para visualizar con facilidad lo que esto provoca, fijemos un trozo de cinta adhesiva en una esponja y estrujemos esta cuidadosamente desde los lados. La cinta adhesiva no participa en la contracción, por lo que formará pliegues ondulados para ajustar su «exceso» de longitud a la base, ahora más corta. Las yemas de los dedos experimentan una situación similar: la rígida capa córnea conserva su superficie hasta que la tensión alcanza cierto valor crítico, momento a partir del cual comienza a arrugarse.

Dedos simulados

Los expertos aspiran a entender mejor no solo los procesos bioquímicos implicados, sino también los físicos y, en particular, los mecánicos. Llama la atención, por ejemplo, que los pliegues causados por la humedad se limiten a unas pocas partes del cuerpo, como los dedos de las manos y los pies, y que aparezcan primero en las yemas.

Entretanto, las simulaciones por ordenador basadas en modelos mecánicos han logrado reproducir con buena precisión la morfología y la evolución mecánica de las arrugas. También muestran que la aparición de los pliegues no tiene tanto que ver con las propiedades materiales de la piel como con el grosor de la capa córnea, que, de hecho, es especialmente abultada en los dedos de las manos y de los pies. Probablemente, estos alcancen antes la tensión crítica porque no pueden comprimirse tanto como otras zonas más blandas de la piel. En otras partes, en cambio, el valor crítico ni siquiera se supera o, si lo hace, aparecen —al menos en los modelos— arrugas tan pequeñas que apenas pueden verse.

Cabe imaginar a dónde podrían conducir estas investigaciones. Mientras que la formación de arrugas en la piel como consecuencia del envejecimiento no parece reversible, la aparición de pliegues debida a la humedad sí que lo es. Si se descubriesen los procesos fisiológicos que hay detrás de estos últimos y se aprendiese a controlar el fenómeno, tal vez algún día las arrugas que aparecen con la edad puedan prevenirse mediante procedimientos cosméticos. IyC

PARA SABER MÁS

Are wet-induced wrinkled fingers primate rain treads? M. Changizi et al. en *Brain, Behavior and Evolution*, vol. 77, n.º 4, págs. 286-290, agosto de 2011.

Water-induced finger wrinkles improve handling of wet objects. K. Kareklas, D. Nettle, y T. V. Smulders en *Biology Letters*, vol. 9, n.º 2, art. n.º 20120999, abril de 2013.

por Alejandro Pérez Carballo

Alejandro Pérez Carballo es profesor de filosofía en la Universidad de Massachusetts en Amherst.



¿Cómo comparar el bienestar de poblaciones diferentes?

Sobre la imposibilidad de plasmar en una ecuación algunos de nuestros valores sociales y políticos más básicos

En pocas horas le harán llegar dos documentos. Cada uno contendrá, con un nivel de detalle extraordinario, una serie de propuestas políticas y económicas de impacto mundial. La decisión sobre cuál de los dos planes implementar estará en sus manos.

Usted —una persona influyente— lleva varios años tomando decisiones similares. Hasta ahora, sin embargo, todo era terriblemente complejo. La descripción de las propuestas era muy abstracta y su efecto sobre la población mundial resultaba muy difícil de evaluar. Y, aun después de que los economistas ingeniasen todo tipo de técnicas para discernir las consecuencias de cada plan de medidas, al final usted tenía que decidir si, por ejemplo, le daba más peso a una política sanitaria que a otra que afectase al nivel de ingresos de la población.

Esta vez le han prometido que todo será un poco más fácil. Los economistas han diseñado un novedoso sistema que permite asignar, a cada habitante del planeta, un número entero que refleje su nivel de bienestar total en función de las distintas variables (salud, educación, renta, etcétera). La fórmula es bastante complicada, pero el consenso entre los expertos, le dicen, es que constituye la mejor manera de aglomerar todos los factores para comparar ambas propuestas.

Así pues, en el apéndice de cada documento encontrará una lista que le informará sobre cuántas personas alcanzarán un nivel de bienestar dado si adopta la propuesta en cuestión. También le aclaran que, si una persona lleva una vida digna, su nivel de bienestar vendrá dado por un número positivo. Si, por el contrario, se trata de una vida con más pesares que buenos momentos, el número correspondiente será negativo. Y finalmente le aseguran que, como parece natural, si un individuo vive mejor que otro, el número que la fórmula asigna al primero será mayor que el que asigna al segundo.

Tras leer ambos apéndices, ha llegado el momento de elegir una de las dos propuestas. ¿Cuán fácil le resultará tomar una decisión?

¿Bienestar promedio o bienestar total?

Sin pensarlo mucho, se le ocurre que hay dos métodos bastante naturales para decidirse. El primero, al que llamaremos «método del promedio», consiste en calcular el nivel de bienestar promedio de la población y, después, elegir la propuesta que arroje el mayor resultado. El segundo, al que llamaremos el «método de la suma», se basa en elegir aquella propuesta que arroje el mayor nivel de bienestar total; es decir, el resultado de multiplicar el nivel de bienestar promedio por el número total de habitantes del planeta.

Por desgracia, tras reflexionar un poco, concluye que ninguno de los dos procedimientos resultará adecuado. De seguirlo al pie de la letra, el primero le obligaría a tomar decisiones realmente descabelladas. Supongamos que el primer conjunto de medidas derivase en la supervivencia de un único habitante en todo el planeta, al que, eso sí, se le asegura un nivel de bienestar extraordinario; 100, pongamos por caso. Ahora imagine que la segunda propuesta deriva en una población de miles de millones, la mitad de los cuales gozan de un nivel de bienestar de 100, mientras que el resto disfruta de un nivel de bienestar de 99. ¡El método del promedio le llevaría a escoger la primera opción!

El segundo procedimiento, sin embargo, tampoco parece funcionar mucho mejor. Este le obligaría a descartar una situación en la que un millón de personas alcanzan un nivel de bienestar de 100, frente a otra en la que más de 100 millones de individuos (100.000.001, por ejemplo) llevan una vida con un nivel de bienestar igual a 1, algo apenas tolerable. En general, el método de la suma le haría preferir una propuesta en la que N millones de personas viven con casi tantos pesares como buenos momentos, frente a otra en la que un millón de personas disfruta de un nivel de bienestar igual a N.

A pesar de todo, usted se dice que tiene que haber algún método que no le obligue a tomar decisiones tan absurdas. Uno distinto de los basados en los niveles de bienestar promedio y total de la población. Pero ¿cuál?

El tamaño de la población

Después de consultar a sus consejeros de confianza, cree entender por qué ninguno de los dos métodos anteriores es adecuado. El método de la suma le da demasiada importancia al tamaño de la población, por lo que tiende a favorecer propuestas que derivan en un gran número de habitantes, pero que no necesariamente implican un buen nivel de vida. En cambio, el método del promedio no le otorga ninguna importancia al tamaño de la población: le basta con un único individuo, siempre que este disfrute de un nivel de bienestar lo suficientemente elevado.

Supone entonces que tal vez la solución consista en ponderar con más tino la importancia que adquiere el bienestar de una persona a medida que aumenta el número de habitantes. Con esta idea en mente, decide considerar una familia de funciones que crezca muy lentamente con el tamaño de la población. Por ejemplo, si n es el número de habitantes, podría usar la clase de funciones $f_r(n)$ dadas por:

$$f_r(n) = \sum_{i=0}^{n-1} r^i = 1 + r + r^2 + \cdots + r^{n-1} ,$$

donde r es un parámetro que satisface $0 < r < 1$. Una vez definidas estas funciones auxiliares y elegido un valor de r, el nuevo método consistirá en elegir aquella propuesta que implique un valor mayor para el resultado de multiplicar el bienestar promedio por $f_r(n)$.

Enseguida ve que es posible escoger un valor de r que evite las disparatadas consecuencias de los métodos anteriores. Consideremos, por ejemplo, la función $f_{0,9}(n)$. El método de la suma le llevaba a preferir una propuesta que resultase en una población de 100.000.001 habitantes con un nivel de bienestar igual a 1, frente a otra en la que un millón de personas disfrutasen de un nivel de bienestar de 100. Eso se debía a que dicho método consistía en multiplicar el nivel de bienestar promedio por el número de habitantes, lo que arrojaba, respectivamente, las siguientes cantidades:

$$1 \cdot (10^8 + 1) = 10^8 + 1 \,,$$
$$100 \cdot 10^6 = 10^8 \,.$$

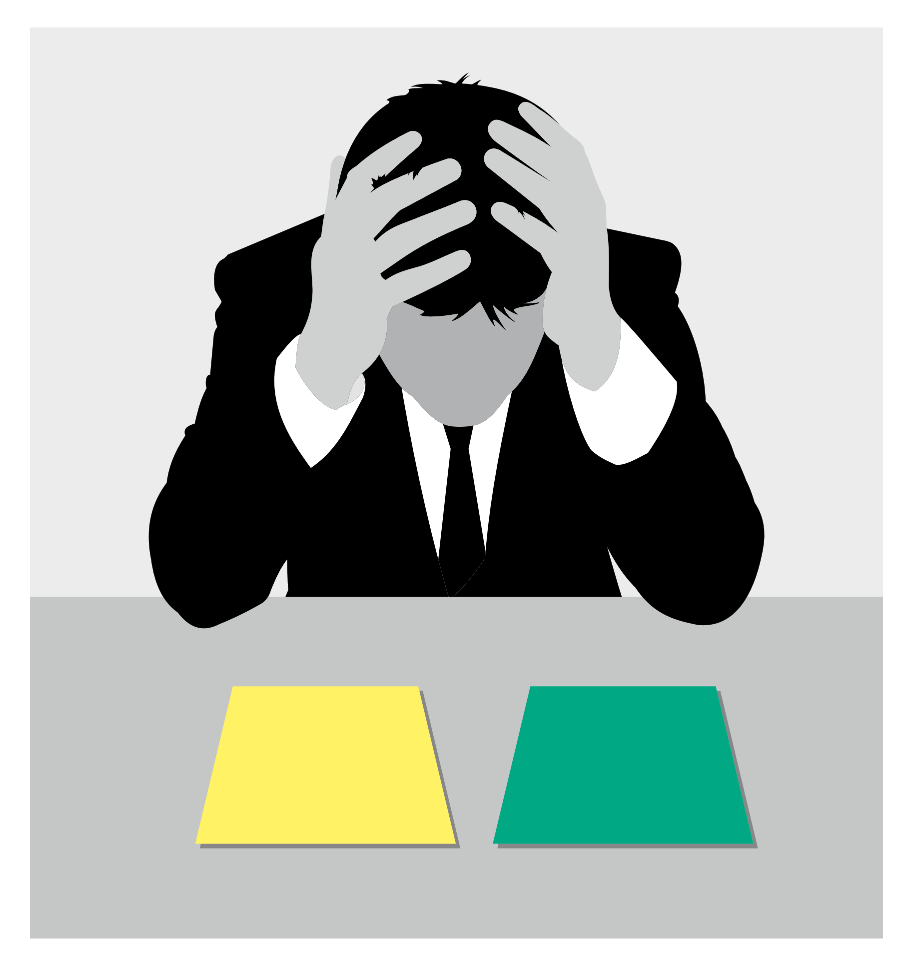
Sin embargo, con el método proporcionado por $f_{0,9}$ eso no ocurre, ya que:

$$1 \cdot f_{0,9}(10^8 + 1) < 100 \cdot f_{0,9}(10^6) \,.$$

Además, tras sentarse con lápiz y papel, comprueba con facilidad que esta manera de proceder también evade el problema del que adolecía la técnica del promedio.

No obstante, pronto se da cuenta de que el método dado por $f_{0,9}$ también le obligaría a tomar decisiones desagradables. Supongamos que una propuesta resulta en un grupo de 100.000 personas con un nivel de bienestar de 100, más otro grupo de 100.000 personas con un nivel de bienestar de 99. Y ahora imaginemos otra propuesta, la cual deriva en 100.000 individuos con un nivel de bienestar de 100, más otros 100 con un nivel de bienestar de −100. Al hacer las cuentas, comprueba con inquietud que el nuevo método le conduciría a elegir el segundo paquete de medidas. Sin embargo, este implica un número nada despreciable de personas con vidas llenas de sufrimiento, mientras que el primero garantizaba a todos un nivel de bienestar extraordinario.

Tales consecuencias se deben a que, dados dos números p y q lo suficientemente grandes, la diferencia entre $f_{0,9}(p)$ y $f_{0,9}(q)$ se halla muy próxima a cero. Por tanto, al comparar dos propuestas que resulten en poblaciones de gran tamaño, el método proporcionado por $f_{0,9}(n)$ consiste esencialmente en comparar los niveles de bienestar promedio de cada una. Y si bien el nivel de bienestar promedio de la primera propuesta es de 99,5, el de la segunda asciende a 99,8.



Último intento

Ya no sabe qué hacer. Desesperado, comienza a pensar en soluciones un poco más complejas. Se le ocurre que tal vez haya que poner más cuidado a la hora de determinar qué importancia otorgar al nivel de bienestar y al tamaño de la población. Por fin, tras varios intentos, y siempre con ayuda de sus mejores consejeros, descubre un método que parece prometedor.

Este requiere, en primer lugar, dividir a los habitantes en dos grupos: el primero, al que llamaremos G, comprenderá aquellos individuos con un nivel de bienestar positivo; el segundo, H, incluirá a todas aquellas personas con un nivel de bienestar negativo.

El siguiente paso consiste en ordenar los miembros de $G = \{g_1, g_2, ..., g_k\}$ de manera que, si $i < j$, entonces el nivel de bienestar de g_i sea igual o mayor que el de g_j; es decir, los colocaremos según un nivel de bienestar descendente. Por otro lado, ordenaremos los miembros de $H = \{h_1, h_2, ..., h_l\}$ de forma que, si $i < j$, el nivel de bienestar de h_i sea igual o menor que el de h_j; es decir, en orden ascendente.

Por último, el nuevo método consiste en elegir aquella propuesta que arroje el mayor valor para la siguiente cantidad:

$$\sum_{i=0}^{k-1} b(g_i)r^i + \sum_{i=0}^{l-1} b(h_i)r^i \,,$$

donde $b(a)$ denota el nivel de bienestar del habitante a y, de nuevo, $0 < r < 1$.

Dado que r^i tiende rápidamente a cero a medida que i aumenta, este método otorga un gran peso a aquellas personas con un nivel de bienestar elevado y, al mismo tiempo, penaliza fuertemente la existencia de individuos con un nivel de bienestar muy negativo. Y, al igual que el tercer método, también tiene en cuenta el tamaño total de la población. De hecho, sus consejeros le aseguran que, si bien la fórmula parece un poco complicada, este procedimiento no implica ninguna de las

consecuencias que había observado en los casos anteriores. Así pues, ¿habrá dado con la solución?

Un teorema de imposibilidad

Por desgracia, este último método también implica consecuencias disparatadas. Imaginemos una propuesta que resulta en 2001 personas con un nivel de bienestar de 100. Y ahora supongamos un segundo paquete de medidas, el cual deriva en un individuo con un nivel de bienestar de 101, 1000 habitantes con un nivel de 100, y otros 1000 con un nivel igual a 1.

Al sentarse con lápiz y papel (y fijando $r = 0{,}9$), descubre con horror que el nuevo método le llevaría a elegir la segunda propuesta. ¡Pero esto resulta absurdo! La primera implicaba un nivel de bienestar total mayor que la segunda, un nivel promedio también mayor que el de la segunda, y una distribución más equitativa. Todo apunta a que la primera propuesta es mucho mejor; sin embargo, el complejo método diseñado por sus consejeros le obligaría a elegir la segunda.

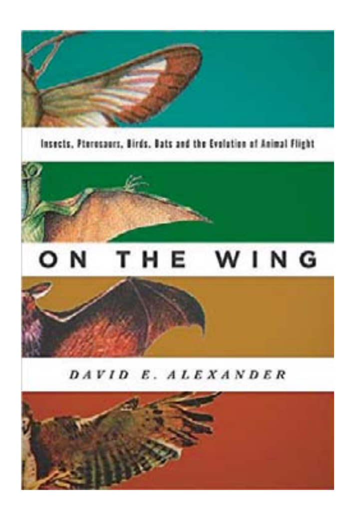
Tal vez, se dice, valga la pena intentarlo mañana. Puede que hoy no tenga la mente clara y el nuevo día le permitirá encontrar, finalmente, un método adecuado.

Pero el optimismo le dura poco. Le cuenta su consejero más sabio —que había permanecido callado durante todo este tiempo— que su problema carece de solución. Un profesor de filosofía de la Universidad de Estocolmo, Gustaf Arrhenius, parece haber demostrado que todo método razonable le llevará a tomar decisiones tan descabelladas como las que le llevaron a descartar los cuatro procedimientos que acaba de considerar.

Tal vez, se dice, las decisiones anteriores no fuesen tan disparatadas. O tal vez la mejor solución a su problema requiera considerar métodos no del todo razonables. IyC

PARA SABER MÁS

Una discusión clásica del problema de comparar el bienestar de poblaciones diferentes es la de Derek Parfit en **Reasons and persons**; Oxford University Press, 1984. El resultado que hemos expuesto aquí aparece en **An impossibility theorem for welfarist axiologies**; Gustaf Arrhenius en *Economics and Philosophy* n.º 2, págs. 247-266, noviembre de 2000. Un excelente repaso a la vasta bibliografía que gira en torno a estos temas es el de Hilary Greaves: **Population axiology**, disponible en su página web: **users.ox.ac.uk/~mert2255**.



ON THE WING
INSECTS, PTEROSAURS, BIRDS, BATS AND THE EVOLUTION OF ANIMAL FLIGHT
David E. Alexander
Oxford University Press, 2015

Alas

Adquisición del vuelo en el mundo animal

Las alas tienen interés ecológico. El éxito de la chicharrita parda (*Nilaparvata lugens*), plaga de los arrozales, depende de su capacidad para desarrollarse en dos formas diferentes en respuesta a claves ambientales. La chicharrita de alas largas huye de entornos hostiles en busca de alimentación; la de alas cortas, perdida su capacidad de volar, se refugia en una elevada tasa de reproducción. Que desarrollen un tipo u otro de alas depende de dos receptores de insulina.

Las alas, y en particular su mimetismo, se presentaron también como la prueba más hermosa de la teoría de la selección natural. Así lo declaró el descubridor del fenómeno, Walter Bates, y como tal fue recibida por el propio Charles Darwin y sus primeros seguidores.

De los aeroplanos a las aves, el vuelo ha despertado la admiración del ser humano, interés que ha experimentado un especial renacimiento en el curso de los últimos diez años. Alexander ha ahondado en su evolución en cada uno de los cuatro grupos animales —los cuatro grandes— que adquirieron dicha capacidad: insectos, pterosaurios, aves y murciélagos. Se trata de la primera obra que ofrece una visión de conjunto; con un estilo llano y riguroso, resalta el nexo entre un tisanóptero diminuto y el poderoso albatros, profundiza en el registro fósil y criba la teoría del origen de las alas. A propósito de estas, se pregunta si las aves volaron desde la copa de los árboles al suelo o si se alzaron en rápida carrera. Aborda las anomalías del mundo de los seres voladores, desde el aleteo frenético del colibrí hasta el planeo de las ardillas. Para la exposición científica se apoya en modelos biomecánicos recientes conjugados con enfoques anatómicos, ecológicos y filogenéticos tradicionales. Conocer de qué modo afecta el tamaño a la fisiología y aerodinámica de los voladores modernos nos permite comprender el vuelo de animales antiguos.

La capacidad de vuelo se adquirió, de forma independiente, en cuatro ocasiones, las correspondientes a cada uno de los cuatro grandes grupos. Con ese fin, la selección natural debió de actuar sobre alguna estructura que tendría al menos propiedades ligeramente alares, quizás una superficie más extensa que se prolongara a ambos lados del cuerpo. Las aves emplearon brazos y plumas modificadas; los murciélagos, los huesos de manos y dedos; las alas de los pterosaurios estaban asentadas sobre dedos enormes con membranas rígidas; las de los insectos, en cambio, no son extremidades modificadas.

Abundan los insectos fósiles. Hace 300 millones de años había insectos bastante mayores que los actuales; se han hallado efímeras fósiles que desplegaban una envergadura alar de 45 centímetros. El mayor insecto conocido era un odonatóptero cuya envergadura alar era de 66-70 centímetros. No obstante, los insectos alados fósiles irrumpen con tal brusquedad que no ayudan a comprender el origen del vuelo. Los neópteros han adquirido una bisagra alar que les permite plegar las alas. Ciertos grupos perdieron más tarde la capacidad de volar y algunos redujeron los dos pares originales de alas a uno. A dos se reducen las teorías prevalentes sobre su origen anatómico: derivan de las branquias larvarias o proceden de lóbulos paranotales, placas llanas que se extienden desde la parte anterior del tórax. Los precursores directos de los insectos voladores serían organismos parecidos a lepismas, de un centímetro de longitud o mayores. Se alimentarían de la parte superior de los tallos de las plantas y saltarían al suelo para huir de los depredadores o acelerar su huida. Poseerían probablemente una buena vista y capacidad para orientarse durante el salto o la caída [*véase* «El vuelo de los insectos», por Michael Dickinson; Investigación y Ciencia, agosto de 2001, *y* «Los insectos: un éxito de la evolución», por André Nel; Investigación y Ciencia, febrero de 2003].

En torno al origen del vuelo de las aves, el debate se polariza entre quienes sostienen la teoría arbórea, o planeo desde la copa, y los partidarios de la teoría corredora, de ascensión tras la carrera. No parece un paso fácil, de acuerdo con los principios de la biomecánica, remontar el vuelo batiendo las alas para superar una pendiente. Una evolución a partir del planeo de los dinosaurios manirraptores sería una hipótesis menos compleja. El arquetipo fósil de la protoave voladora sería *Archaeopteryx*. Al cumplirse el sesquicentenario del descubrimiento en Baviera de ese fósil con plumas, el equipo dirigido por Xing Shu desenterró el terópodo *Xiaotingia zhengi*, que ha obligado a replantearse el origen de las aves, las cuales serían dinosaurios con adaptaciones fisiológicas para el vuelo. Si los primeros pterosaurios caminaron a cuatro patas y no fueron corredores bípedos, no sería verosímil un origen del vuelo desde el suelo. El precursor arbóreo entraña conexiones con la percepción, modificaciones del sistema nervioso y diversidad estructural [*véase* «El origen de las aves y su vuelo», por Kevin Padian y Luis M. Chiappe; Investigación y Ciencia, abril de 1998, *y* «El origen de las aves modernas», por Gareth Dyke; Investigación y Ciencia; septiembre de 2010].

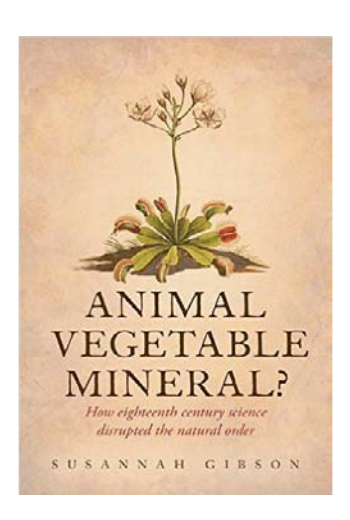
Menos duda cabe de que los murciélagos evolucionaron a partir de antepasados arbóreos planeadores. La genética ha resuelto la polémica en torno a una posible adquisición del vuelo por los micromurciélagos distinta de la seguida por los megamurciélagos: hubo un solo origen. Se presume que el vuelo y la ecolocación, unidos por la nocturnidad y por una vinculación física literal entre el aleteo y la producción de la llamada (que requiere una notable fuerza muscular), evolucionarían a la par [*véase* «Origen y evolución de los murciélagos», por Nancy B. Simmons; Investigación y Ciencia,

marzo de 2009]. Algunas aves e insectos han perdido su capacidad de vuelo, pero no ocurrió así con los murciélagos o los pterosaurios. En estos dos últimos grupos, debido al uso de sus extremidades en el vuelo. Las aves han perdido su capacidad de vuelo en las islas; los insectos, al convertirse en ectoparásitos o en entornos insólitos.

Otros animales llevaron el planeo muy lejos. Pensemos en las ardillas y los peces voladores. Otros excelentes planeadores son las ranas voladoras, de dedos largos y unidos por una membrana interdigital que les permite planear entre ramas. Existen también lagartos dragón cuyos pliegues móviles se extienden a modo de alas para planear de un árbol a otro. Quizá los animales más fascinantes de todos sean las serpientes planeadoras, que saltan desde la rama donde estén, aplanan su cuerpo y vuelan planeando, en forma de ese, de árbol en árbol o hacia el suelo, con un ángulo de 30 grados.

Todo indica que, con excepción del pterosaurio, la capacidad de volar pudiera resultar clave para el predominio de insectos, aves y murciélagos en el reino animal. Hay más especies de insectos que del resto de los animales considerados en conjunto, y un 98 por ciento de ellos poseen alas. De los cuatro grupos, los tres que siguen medrando constituyen ejemplos de particular éxito. Ahí radica el interés del estudio del vuelo.

—Luis Alonso



ANIMAL, VEGETABLE, MINERAL?
HOW EIGHTEENTH-CENTURY SCIENCE DISRUPTED THE NATURAL ORDER
Susannah Gibson
Oxford University Press, 2015

Historia natural

Drástica renovación en el Siglo de las Luces

A finales del siglo xviii, la vieja doctrina aristotélica sobre la división del mundo natural en tres reinos estancos e infranqueables (mineral, vegetal y animal), que perduró a lo largo de más de dos milenios, había quedado desautorizada. Nuevas ideas que definían a los animales por su mecánica o su química merecían mayor respetabilidad; conceptos que se consolidaron a lo largo del siglo xix, sistematizados en el marco de nuevas disciplinas (teoría celular, fisiología, embriología, bioquímica, microbiología y teoría evolutiva), y con sus métodos e instrumentos respectivos, transformaron de raíz la consideración del organismo y el parentesco entre especies. E incluso las previsiones de futuro. En una carta a Thomas H. Huxley fechada el 26 de septiembre de 1857, Charles Darwin imaginaba un tiempo que describía así: «Aunque yo no viviré para verlo, tendremos árboles genealógicos de cada uno de los grandes reinos de la naturaleza».

Las características distintivas del organismo animal y vegetal habían sido debatidas a lo largo de los siglos. En su *Historia de los animales,* Aristóteles establece los cuatro criterios que definen a un animal: nutrición, reproducción, sensación y fisiología. El animal necesitaba un aparato digestivo y un sistema reproductor, experimentar sensaciones y contar con sangre y vasos. El estagirita escribió además un tratado *Sobre el movimiento de los animales*, propiedad arquetípica de estos seres. No era necesario que los cinco factores se dieran simultáneamente; a menudo bastaba con la presencia de uno o dos para incluir a un individuo en el reino animal.

Durante la Ilustración, los imperios europeos se hallaban en expansión y miles de nuevas especies fueron conocidas por la ciencia occidental. A medida que los naturalistas estudiaban nuevas especies procedentes de los cuatro puntos cardinales, se fueron percatando de que no todas encajaban con facilidad en las categorías aceptadas. Para ahondar en su conocimiento, se llevaron a cabo experimentos sobre corales, esponjas, venus atrapamoscas, estrellas o erizos de mar. Muchos naturalistas los consideraban mezcla de animal y planta, para otros eran vegetales con rasgos animales, y otros los calificaron como plantas que a veces se comportaban como animales. Los zoófitos planteaban un reto para demarcar una definición tajante de animal y de planta, así como para la relación consiguiente entre ambos reinos. Hasta el siglo xviii, y pese al interés de Aristóteles y otros naturalistas clásicos y modernos, los zoófitos no pasaron de representar un apéndice irrelevante.

El asunto cambió a raíz de los descubrimientos de Abraham Trembley (1710-1784), quien se aprestó a encontrar la identidad de los zoófitos. Tras la poda, las plantas se regeneraban, no así los animales; por tanto, los pólipos amputados y regenerados se comportaban a ese respecto como plantas. Otras propiedades, sin embargo, los incardinaban en el reino animal; en particular, el movimiento de los tentáculos. También su sensibilidad al tacto y su nutrición, aspecto este último que ya había sido subrayado por Hermann Boerhaave. Las fronteras parecían borrosas. Pero la confusión no solo se debió a los zoófitos: merced al microscopio, se había descubierto en el siglo xvii la presencia de seres minúsculos en el interior de vegetales y animales. Con todo, hubo que esperar hasta el siglo xix para descubrir el núcleo celular y armar una teoría de la célula.

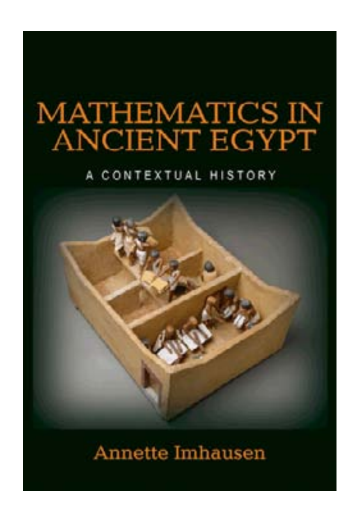
En uno de los experimentos más singulares para investigar la generación espontánea, Lazzaro Spallanzani (1729-1799) creó una suerte de calzas para ranas y demostró que macho y hembra participaban en la reproducción. Antes de esa observación, se debatía la función real del semen del macho, y muchos opinaban que solo la hembra era imprescindible para la concepción. Esos y otros experimentos arruinaron muchas teorías predominan-

tes en el siglo XVIII sobre la reproducción, incluida la teoría de la preformación. Esta establecía que las personas, los animales y las plantas existentes y por existir habían sido creados por Dios en el comienzo del mundo, para luego desplazarse en una serie ordenada y anidada en el progenitor.

No dejaban de desenterrarse fósiles, supuestos caprichos de la naturaleza que podían adquirir cualquier forma. Y también se consideraron otras curiosidades: plantas que sienten e incluso que piensan, plantas carnívoras y plantas irritables. La venus atrapamoscas fue observada por los europeos a mediados de los años 1760; criada en sus jardines, las alimentaban con moscas para estudiar su funcionamiento. Sobre todo gracias a Carlos Linneo, se investigó también la reproducción sexual de los vegetales.

España, según la tesis canónica, perdía pujanza en su rivalidad con Inglaterra y Francia. Pero si atendiéramos a las imágenes botánicas aparecidas entre 1759 y 1808, no deberíamos hablar de declive. Con la entronización de Carlos III se produjeron unas 60 expediciones científicas. El estudio de la naturaleza se convirtió en una herramienta de competición entre las potencias coloniales del mundo atlántico. La Corona fue el catalizador de las exploraciones y del descubrimiento de nuevas fuentes de ingreso para las arcas del Estado. Si hasta entonces la riqueza se había asentado en el beneficio de los minerales, en el siglo XVIII se cambió el foco de atención: las riquezas vegetales de la América española superaban a las minerales, con la ventaja añadida de que podían propagarse y multiplicarse *ad infinitum* una vez aclimatadas.

—Luis Alonso



MATHEMATICS IN ANCIENT EGYPT
A CONTEXTUAL HISTORY
Annette Imhausen
Princeton University Press, 2016

Matemática egipcia

Momentos cumbre

Desde hace más de dos siglos, Egipto viene ejerciendo una poderosa fascinación sobre el mundo de las artes y las letras. Menos conocida es la pasión que despierta entre los científicos, por ejemplo, el estudio de las momias y su interés en genética humana. Hace un año, el equipo dirigido por Frank Rühli, de la Universidad de Zúrich, se anotaba un éxito importante al corroborar la sospechada endogamia de los faraones.

Egipto y Mesopotamia fueron las culturas iniciadoras de refinados sistemas matemáticos. La aritmética mesopotámica se basaba en el sistema numérico sexagesimal. El egipcio constituía un sistema decimal sin notación posicional, que utilizaba símbolos propios para cada potencia de 10. Las primeras publicaciones sobre la matemática del Egipto faraónico surgieron en la segunda mitad del siglo XIX, a raíz de la adquisición por el Museo Británico del papiro de Rhind y su posterior estudio. Tras la publicación en 1877 del papiro de Rhind (tuvo otras dos ediciones, en 1923 y 1927), se editaron en 1898 importantes textos matemáticos de los papiros de Lahun; en 1900 y 1902, fragmentos del papiro de Berlín 6619; y, en 1930, el papiro de Moscú. Debemos a Otto Neugebauer y Kurt Vogel monografías notables sobre el cálculo de fracciones egipcio. Han despertado también el interés de los matemáticos el cálculo del área del círculo, el del volumen de una pirámide truncada y el método de solución de un grupo de problemas (similar a nuestras ecuaciones algebraicas).

Basándose en textos, proyectos y dibujos de arquitectura, documentos administrativos y otras fuentes, Imhausen pasa revista a tres mil años de historia egipcia y ofrece un cuadro integrado de la matemática teórica y de su aplicación a la vida diaria. El libro se escalona en períodos sucesivos: prehistórico y protodinástico, Reino Antiguo, Reino Medio, Reino Nuevo y período greco-romano.

El período prehistórico y protodinástico abarca el tiempo de transición desde una sociedad disgregada en múltiples asentamientos hacia un estado unificado, con un gobierno central y bajo la administración de un rey. Sus sedes principales estuvieron en Maadi y Buto, en el Bajo Egipto, y en Badari y Naqada, en el Alto Egipto. La cultura meridional dominó sobre la septentrional y encabezó la unificación del nuevo Estado; las primeras fuentes escritas surgieron en ese tiempo. Las pruebas de la invención de la escritura —y de la notación numérica— se vinculan a Abydos y a su cementerio de Umm al-Qaab, unos 500 kilómetros al sur de El Cairo. Entre las tumbas de las élites predinásticas, la tumba U-j (asignada al rey Escorpión, en torno al 3200 a.C.) ocupa un lugar significativo: en su interior se descubrió la prueba más antigua de escritura jeroglífica [*véase* «El nacimiento de la escritura en Egipto», por Gwenola Graff; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2014]. Se utilizaron marcas simbólicas y sellos reales para identificar bienes y, con ello, agilizar la administración. La utilidad de un sistema numérico en ese contexto era obvia.

Durante el Reino Antiguo (entre 2686 y 2160 a.C.), Egipto disfrutó de su primera época de esplendor. Arte, arquitectura y creación literaria brillaron apuntaladas por la estabilidad económica y política. Destaca de ese tiempo la imponente pirámide del rey Djoser (2667-2648 a.C.). No han sobrevivido textos. La metrología facilitaba el control cuantitativo de los recursos. Algunas unidades de medida permanecieron a lo largo de toda la historia de Egipto, otras cambiaron o desaparecieron. Las había vinculadas a un tipo específico de objetos, lo que suponía, por ejemplo, la existencia de

diversas medidas de volumen según el contenido fuera grano, líquido o material de construcción. En el Reino Antiguo, la unidad de longitud básica era el codo, que venía a valer unos 52,5 centímetros; la unidad de capacidad, *hqȝ.t,* equivalía a unos 4,8 litros; y la de peso, *dbn*, equivalía a unos 13,6 gramos.

Hasta el Reino Medio (2055-1650 a.C.) no aparecen textos matemáticos, y aun entonces no llegan a la decena. Carecemos de información escrita sobre cómo llevaban a cabo las operaciones de adición y sustracción; las multiplicaciones y divisiones se disponían en dos columnas. Recurrían a varias técnicas para multiplicar y dividir. Si intervenían fracciones, el cálculo se hacía más complicado, precisando a menudo el uso de tablas, algunas de las cuales se han conservado. El papiro de Rhind consta de dos piezas, contiene 64 problemas y varias tablas. Merecen reseñarse también los fragmentos matemáticos de Lahun, el papiro matemático de Berlín, las tablillas de El Cairo, el Rollo de Cuero Matemático y el papiro matemático de Moscú. Este último contiene 38 columnas de texto y nueve pequeños fragmentos, presenta 25 problemas e incluye los dos problemas más intrigantes de la matemática egipcia: el cálculo del volumen de una pirámide truncada y lo que parece ser el cálculo de la superficie de una semiesfera o de la superficie de un semicilindro.

Del Reino Nuevo (1550-1069) no han sobrevivido apenas textos matemáticos, pese a que la mayoría de los faraones famosos gobernaron durante ese intervalo. Las inscripciones monumentales, en cambio, permiten pintar un cuadro bastante preciso de la situación. Con la expansión del uso de los *óstraka* como soporte económico de escritura, descubrimos el día a día de la población. El país, unido, alcanza su tercera época de esplendor cultural, merced sobre todo al impulso dado por Akhenatón, promotor del culto al dios Atón y que trasladó la capitalidad de Tebas a Tel el-Amarna. Pero, salvo dos *óstraka* fragmentarios, no nos han llegado textos matemáticos.

Pervive, en cambio, una importante remesa de textos matemáticos del período greco-romano (332 a.C-395 d.C). Por la lengua empleada se conocen como textos matemáticos demóticos, y constituyen los textos matemáticos finales disponibles del Egipto clásico. El papiro de El Cairo, el más extenso, consta de 11 piezas y contiene 40 problemas. Le sigue en extensión el papiro BM 10399, cuya parte publicada contiene 12 problemas, cuatro de ellos relativos al volumen de una estructura en forma de cono y seis a la resolución de fracciones.

De las cuestiones pasadas por alto en el libro de Imhausen, algunas parecen apremiantes: por ejemplo, si el comercio egipcio ejerció alguna influencia en el desarrollo de la matemática; cuál es la geometría que se esconde tras sus diques y canales; y la posibilidad de que los antiguos egipcios usasen de técnicas de «cálculo de sombras» en astronomía y agrimensura.

—Luis Alonso

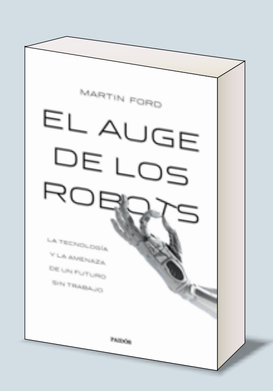
NOVEDADES



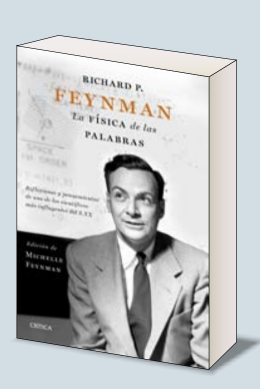
SOÑADORES
CUATRO GENIOS QUE CAMBIARON LA HISTORIA
Cédric Villani y Edmond Baudoin
Astiberri, 2016
ISBN: 978-84-16251-58-2
192 págs. (19 €)



LA SAVIESA COMBINADA
REFLEXIONS SOBRE ECOLOGIA I ALTRES CIÈNCIES
Joandomènec Ros
Edicions Universitat de Barcelona, 2016
ISBN: 978-84-475-3933-8
312 págs. (24 €)



EL AUGE DE LOS ROBOTS
LA TECNOLOGÍA Y LA AMENAZA DE UN FUTURO SIN EMPLEO
Martin Ford
Paidós, 2016
ISBN 978-84-493-3230-2
304 págs. (21 €)



RICHARD P. FEYNMAN: LA FÍSICA DE LAS PALABRAS
REFLEXIONES Y PENSAMIENTOS DE UNO DE LOS CIENTÍFICOS MÁS INFLUYENTES DEL S. XX
Dirigido por Michelle Feynman
Crítica, 2016
ISBN: 978-84-9892-968-3
408 págs. (21,90 €)

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Agosto 1966

In vitro

«Si los óvulos de conejo y cerdo pueden fecundarse tras su maduración en cultivo, cabe suponer que también puedan fecundarse óvulos humanos cultivados, aunque desde luego no sería lícito implantarlos en un receptor humano. Hasta ahora, nuestros intentos de fecundar in vitro óvulos humanos han fracasado o, como mucho, han tenido un éxito muy limitado. Nos proponemos seguir con estos experimentos; la capacidad de observar óvulos humanos dividiéndose podría ser de un gran valor médico y científico. La esterilidad causada por el tránsito defectuoso de los embriones por la trompa de Falopio podría mitigarse si se extrajeran los ovocitos del ovario, se cultivaran y fecundaran in vitro, y luego se reintrodujeran en la madre. —R. G. Edwards.»
Por este trabajo Robert G. Edwards recibió un premio Nobel en 2010.

Innovaciones bélicas

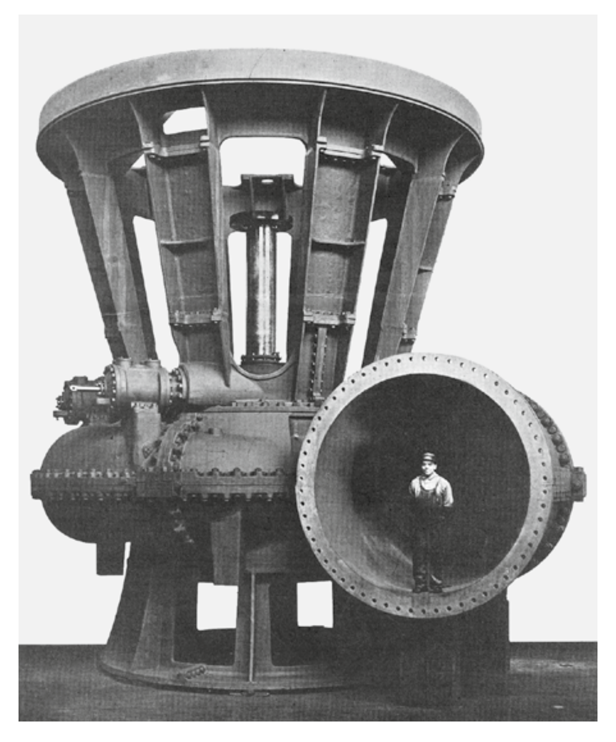
«La más radical de las novedades de este conflicto ha sido el cambio de la guerra de movimientos, con unos ejércitos que maniobran libremente en campo abierto, a la guerra de trincheras, con unos contendientes prácticamente inmóviles aferrados a unas posiciones carentes de flancos. En la nueva guerra de trincheras, la innovación más drástica ha sido, primero, la eliminación del fuego de fusil de largo alcance y, segundo, la sustitución de este por la antigua granada de mano modernizada. Parece que en el asalto a una posición la infantería se mueve con más desembarazo y resulta más efectiva con la granada de mano que con el fusil.»



Agosto 1916

Energía para el progreso

«En los grandes planes de electrificación de las líneas de Puget Sound del ferrocarril de Saint Paul, el suministro eléctrico necesario para la explotación de esas líneas procederá de un extenso sistema de centrales eléctricas. En la ilustración se muestra el rodete de una de las turbinas hidráulicas electrogeneradoras de una de las centrales de la Montana Power Company. Las líneas de transmisión de la compañía forman una red que cubre la mayor parte de Montana y una porción de Idaho, con lo que abastecen no solo a los 700 kilómetros de ferrocarril, sino también a numerosas empresas mineras. Para ese trabajo la compañía dispone de doce centrales que alcanzarán una capacidad final de 243.890 kilovatios.»



1916: Una turbina de 15.000 caballos de potencia para dar corriente al tramo electrificado del ferrocarril entre Chicago, Milkwaukee y Saint Paul, en Montana.



Agosto 1866

Un telégrafo algo caro

«Tuvimos ocasión de enviar, por el cable transatlántico, un mensaje telegráfico, de veinte palabras exactamente, a nuestro corresponsal en Londres, que, según la tarifa publicada, tendría que haber sido tramitado por 20 libras esterlinas. Pero el director en este extremo de la línea nos cobró 24 libras, o 120 dólares de oro, para incluir la fecha de la transmisión. Deseamos éxito a la Submarine Telegraph Company, pero nos parece imposible que el público pueda admitir unos precios tan exorbitantes y, tal nos parecen, abusivos.»

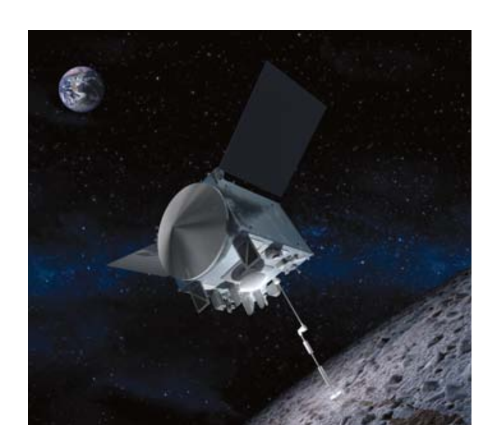
Carne urbana

«Se está construyendo un nuevo matadero al final de la calle 106 de Nueva York. Pretende sustituir a los mataderos hoy existentes, que causan enfermedad y muerte entre quienes viven en sus proximidades. El edificio, de madera, se está levantando de cara al río, sobre pilotes hincados en tierra por debajo del nivel de crecida de aguas, y con una plataforma en la margen del río con canalones y enrejados para descargar los residuos y desperdicios por debajo del nivel de estiaje del río. Un total de veinte aparejos permite sacrificar hasta 1500 novillos diarios. La sangre se empleará para abonos, la grasa se fundirá y venderá, y las demás materias se desecharán.»

Vicio y beneficio

«El *Presupuesto para las Indias Orientales*, recién presentado al Parlamento británico por lord Cranborn, contiene algunos hechos curiosos acerca del comercio de opio como fuente de ingresos. Los ingresos brutos del Gobierno durante los años 1864-1865 ascendieron a 47.041.000 libras, mostrando un pequeño superávit a causa de la inesperada tasa aduanera sobre el opio. El total de esa cantidad la pagan los chinos, consumidores de la droga. Se cree ahora que la demanda china de opio está tan asegurada como la demanda de cerveza y ginebra con la que cuenta el ministro británico de Economía y Hacienda.»

SCIENTIFIC AMERICAN SUPPLEMENT, VOL. LXXXII, N.º 2121, 26 DE AGOSTO DE 1916



ASTRONOMÍA

La misión OSIRIS-REx

Dante S. Lauretta

Una nueva sonda hacia el asteroide Bennu se propone encontrar huellas de la formación del sistema solar.





AGRICULTURA

CRISPR llega a los cultivos

Stephan S. Hall

Una potente herramienta de edición de genes está revolucionando la agricultura y podría transformar el debate sobre la manipulación genética.



FÍSICA

Teorías supracuánticas

Miguel Navascués

¿Es la física cuántica una teoría fundamental?

COGNICIÓN

Efectos cerebrales de los videojuegos

Daphne Bavelier y C. Sharen Green

Disparar a zombis y repeler invasiones extraterrestres mejora nuestras capacidades mentales.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Seth Fletcher, Christine Gorman, Clara Moskowitz, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
PUBLISHER AND VICE PRESIDENT Jeremy A. Abbate

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes*; Elena Baixeras: *Apuntes*; Fabio Teixidó: *Erupciones volcánicas y extinciones masivas* y *Las guerras del calentamiento global*; Carlos Lorenzo: *El éxito evolutivo de los mamíferos*; Javier Grande: *Supernovas extrañas* y *¿Por qué se arrugan los dedos mojados?*; Xavier Roqué: *Historia de las emociones y cambio social*; Alberto Ramos: *El acelerador que podría cambiar la física*; José Óscar Hernández Sendín: *Aprendizaje profundo* y *La verdad sobre los coches sin conductor*; Marián Beltrán: *¿Hemos de temer a los robots superinteligentes?*; Luis Cardona: *Los genios del mar* y *Presión turística sobre la vida silvestre de las Galápagos*; Mercè Piqueras: *Las secuelas del agente naranja*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3
08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España